

eVTOL 飞行器适坠性研究进展与展望



刘小川^{1,2,3}, 惠旭龙^{1,2,3}, 白春玉^{1,2,3}, 李肖成^{1,2,3}, 张欣玥^{1,2,3}, 韩鹤朝^{1,2,3}

1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 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
3. 陕西省飞行器振动冲击与噪声重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要: 电动垂直起降飞行器(eVTOL)作为低空经济领域的新兴装备,具有广阔的应用前景和市场需求,但其安全性尚未得到充分验证和评估,尤其是在紧急情况下的适坠性和乘员保护方面。适坠性是复杂的非线性冲击动力学问题,适航标准和咨询通告等法规政策对飞机适坠性作出了明确规定,要求通过合理的设计确保乘客安全,具体涉及机体的坠撞变形与结构吸能、乘员座椅系统的复杂约束与保护措施、起落架系统的吸能设计与承载等多个方面,相关的设计需要通过试验方法或经验证的分析方法进行评估。本文针对eVTOL适坠性研究中的几个关键问题,如适航要求和验证方法、结构适坠性设计、乘员座椅系统坠撞试验与分析、电池系统坠撞试验与分析以及机体结构坠撞试验与分析等近年来的研究情况进行了分析,总结了主要研究进展,并分析了当前研究面临的主要挑战,期望为eVTOL适坠性设计与评估提供一定的借鉴。

关键词: eVTOL; 适坠性; 适航要求; 坠撞试验; 仿真分析; 积木式验证

中图分类号: V271.1

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.02.001

电动垂直起降飞行器(eVTOL)可以在城市内或城市间提供低成本、低噪声和快速可靠的点对点飞行服务,既能作为“飞行汽车”供人们便捷出行,也可作为“空中的士”提供公共交通服务。eVTOL 航空器使用电推进,具有垂直起降能力,相比于其他类型航空器,eVTOL的便利性、环保性和经济性使其在低空经济方面具有较大的优势和应用前景^[1],典型的应用场景主要包括载人运输、物流运输和应急救援等^[2]。

eVTOL 主要在城市及周边的低空空域使用,使用条件复杂,其复杂运营环境下的安全性是制约其更广阔应用的关键因素,适坠性(或抗坠毁性)是其安全性的核心,尤其这类事故发生后往往伴随着人员伤亡或财产损失,在自媒体高度发达的当代社会,容易引发大范围的舆情,对行业的健康发展造成不利影响。

商用飞机适坠性已有较好的研究基础和工程实践经验,适坠性是指在飞行器紧急坠撞发生时其机体结构、座椅系统、逃生装置等应能具有保护乘员,使之最大可能地不受

致命伤害的特性^[3]。对此,中国、美国和欧盟分别出台了相应的适航条例,其中均对载人飞行器的适坠性有着明确而严格的要求。近几十年来,欧美国家针对传统飞机的适坠性问题,开展了系统性的研究工作,完成了大量机身坠撞试验和仿真分析工作^[4-9],建立了多层级的适坠性研究体系^[10],并应用于波音 787、空客 A350 等多型民机研制中^[11-12]。美国还先后开展了全机级别的坠撞试验研究,完成了L-1649、DC-7、SHORTS 3-30、ATR42-300、波音 727、F-28 等多个飞机的全机坠撞试验^[13-18],获得了丰富的试验数据。国内近年来围绕民用飞机的适坠性问题,也开展了持续深入的研究工作。形成了涵盖材料动力学行为^[19-21]、新型吸能结构和部件设计^[22-27]、座椅系统抗冲击与乘员保护^[28-31]、全尺寸机身段坠撞试验与分析^[32-35]、整机受控式坠撞试验^[36]等多层级的适坠性试验和仿真分析技术体系^[37-39],如图1所示。

相较于传统构型的商用飞机,eVTOL在适坠性设计与评估方面存在较多难点,主要表现为:飞行器构型多样,缺

收稿日期: 2024-12-25; 退修日期: 2025-01-15; 录用日期: 2025-01-23

引用格式: Liu Xiaochuan, Xi Xulong, Bai Chunyu, et al. Progress and prospects on the crashworthiness of eVTOL vehicles[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(02): 1-28. 刘小川, 惠旭龙, 白春玉, 等. eVTOL 飞行器适坠性研究进展与展望[J]. 航空科学技术, 2025, 36(02): 1-28.

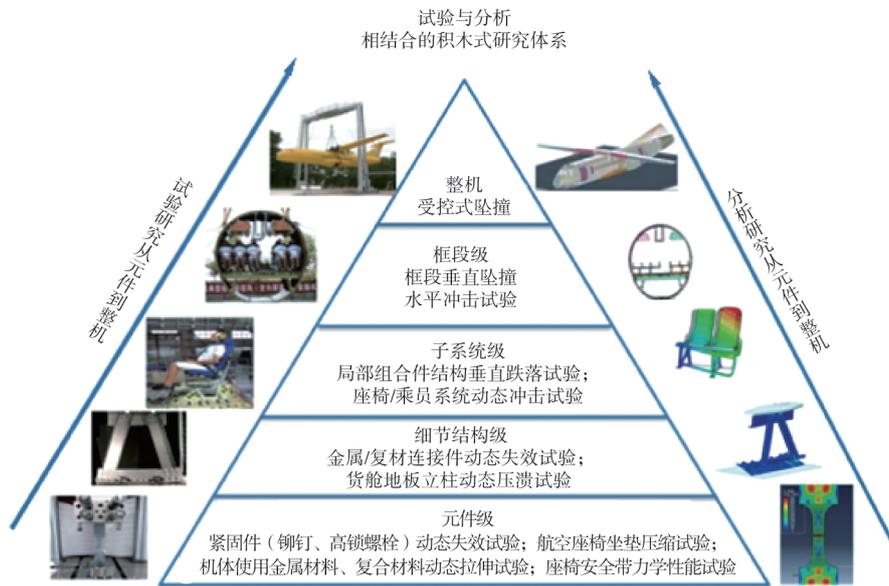


图1 民机适坠性多层次研究体系

Fig.1 Multi-level research system for aircraft's crashworthiness

乏统一的设计要求;无动力着陆能力较弱,可能的坠撞环境又极其复杂(如地面条件、建筑物等),相对容易发生倾覆、翻滚等离轴碰撞等特殊情况^[2];因能源系统限制,追求极致轻量化,大量使用低成本复合材料,结构被动,吸能能力受限制;飞行器一般尺寸较小,缺少适坠性设计所需的空间,较难布置吸能元件等。传统商用飞机与eVTOL的适坠性特征对比见表1。

表1 不同类型飞机的适坠性对比

Table 1 Comparison of crashworthiness between different types of aircraft

适航要求	固定翼飞机	直升机	eVTOL
无动力着陆能力	强	中	弱
结构轻量化要求	低	中	高
座舱底部空间	大	中	小
复合材料使用率	中	中	高

结合商用飞机适坠性的成熟工程经验,考虑到eVTOL的特点,eVTOL适坠性的基本要求应该包括:一是乘员保护,考虑到eVTOL坠撞环境的复杂性和多样性,建议采用更高等级的乘员约束措施,防止坠撞过程中的碰撞伤害;二是生存空间,eVTOL飞行器应有一定的生存空间保持能力,避免挤压等伤害;三是能量吸收,综合使用抗坠毁座椅与着陆架、能量吸收材料等,限制典型场景下传递至乘员的冲击载荷;四是抑制二次效应与应急撤离,对电池系统坠撞后的起火、爆炸等二次效应采取有效措施进行抑制,同时考

虑舱门等的应急开启等。

本文总结了eVTOL适坠性方面的诸多难点和技术挑战,分别从适航要求和验证方法、结构适坠性设计、乘员座椅系统坠撞试验与分析、电池系统坠撞试验与分析以及机体结构坠撞试验与分析等方面讨论了近些年来国内外针对eVTOL飞行器适坠性研究方面做的相关工作,期望为eVTOL飞行器适坠性设计与评估提供借鉴。

1 适航要求和验证方法

作为民用航空器,获得适航证是其可以合法开展运营的前提。适航证颁布的前提条件是航空器型号设计已获得民航管理部门的批准,符合特定适航法规要求^[40-41]。

1.1 航空器类别与适航法规

为了确保航空器在设计、制造和运营过程中的安全性和可靠性,民航局发布了各类航空器的适航法规,主要包括适航规章和专用条件。适航规章是由适航管理机构制定的法规性文件,它们规定了航空器设计、制造、运营等各环节必须遵守的安全和性能标准。如中国民用航空规章(CCAR)23部^[42]、25部^[43]、27部^[44]、29部^[45]、31部^[46]等。专用条件是针对于特定型号航空器,由适航管理机构制订的一组特定的适用其具体设计和预期用途且具有可接受安全水平的适航要求。这些条件通常用于那些没有现成适航规章覆盖的新型或特殊设计的航空器。表2给出了常见航空器类别及适航法规。

表2 常见航空器类别及适航法规

Table 2 Common categories and regulations of aircraft products

航空器类别	适航法规	座位数
正常类飞机	CCAR-23	9座或以下
实用类飞机		
特技类飞机		
通勤类飞机		19座或以下
运输类飞机	CCAR-25	
正常类旋翼	CCAR-27	9座或以下
运输类旋翼	CCAR-29	
载人自由气球	CCAR-31	
特定型号	专用条件	

1.2 典型的eVTOL和分类

eVTOL发展至今,根据其使用目的的不同已演变出多种构型形式,如图2所示。eVTOL通常设计搭载2~10名乘客,在城市环境中飞行短途路线,并允许自主操作。许多制造商目前处于开发设计和原型制造阶段,并在eVTOL设计中大量使用复合材料、分布式电动推进(DEP)和旋翼叶片。



图2 典型的eVTOL飞行器类型

Fig.2 Typical eVTOL types

根据eVTOL矢量推力构型的不同,其分类主要包括:(1)按矢量推力的方式考虑,包括但不限于倾斜翼、倾转旋翼、倾转涵道复合翼构型,多旋翼构型和单旋翼构型。(2)从提供电力的方式可分为可再生资源 and 不可再生资源。可再生资源包括太阳能、氢燃料等;不可再生资源包括锂电池、氢燃料电池、锂电池+燃油等。(3)单纯从驾驶飞行器角度出发可分为无人驾驶和有人驾驶两种类型。(4)从搭载物角度出发,可分为载人、载货及兼容载人载货三种类型。

为了使eVTOL能为公众接受,首先必须达到高水平的安全性。对于不同类别的eVTOL要采用适用的适坠性适航符合性验证要求和验证方法。

1.3 eVTOL 航空器适航分析

根据CCAR-21-R4第21.17条^[41],针对eVTOL这类非

常规航空器,应当符合CCAR-23部、25部、27部和29部等有关适航规章中的适用要求或者民航局确认适用于该具体的设计和预期用途且具有等效安全水平的其他适航要求。

1.3.1 适航规章分析

在各类航空器的适航规章^[42-46]中,关于航空器应急着陆的适航要求主要包括第561条(总则)、562条(应急着陆)和952条(燃油系统的抗坠撞性)。这些条款对航空器乘员的周围结构、客舱地板下的燃油箱(或电池组件)区域的机身结构、航空器支撑结构以及乘员座椅提出了具体要求。

eVTOL采用电力推进系统,可以实现垂直起降,其动力装置和构型与常规飞机具有较大差别。目前民航局尚未针对该类型航空器颁布专用的适航规章。根据eVTOL的构型,其适坠性要求可参考类似航空器的适航规章条款。例如,对于旋翼/多旋翼构型的eVTOL可以参考CCAR-27部的相关条款,对于固定翼构型的eVTOL可以参考CCAR-23部的相关条款。

1.3.2 专用条件分析

针对具体的eVTOL型号,欧洲航空安全局(EASA)、中国民用航空局(CAAC)等局方均制定了专用条件,确定适用其具体设计和预期用途且具有可接受安全水平的适航要求。

(1) EASA发布的专用条件

EASA调研了至少150个垂直起降飞行器(VTOL)项目,认为垂直起降飞行器无法简单归类于传统的固定翼或旋翼类航空器。因此,基于现有规章并结合VTOL的特点,于2019年7月率先发布了SC-VTOL-01等专用条件,为VTOL适航取证提供了参考路径^[47]。

SC-VTOL-01文件适用于乘客座位配置为9个或更少的VTOL,最大起飞重量不高于3175kg。同时将审定类型与运行场景相匹配,按运行场景将VTOL的审定类型分为基本型和增强型,并规定了不同类型VTOL的安全目标和失效条件。获得增强级认证的垂直降落飞机必须满足持续安全飞行和着陆的要求,并且在出现故障后能够继续飞往原计划的目的地或合适的备用机场。而对于基础级认证的飞机,则只需满足受控紧急着陆的要求,类似于受控滑翔或自动旋转^[48]。

(2) CAAC发布的专用条件

2022年2月,CAAC针对亿航EH216-S型载人无人驾驶航空器的具体设计和预期用途,基于项目风险和审定目标,结合工业实践,发布了首个eVTOL项目专用条件《亿航EH216-S型无人驾驶航空器系统专用条件》^[49]。EH216-S

是可用于载人的无人驾驶航空器,可搭载2名乘员。专用条件中PEU.C070应急情况条款规定了应急着陆时的乘员保护能力要求以及行李舱、货舱和动力/电力系统的应急着陆要求。具体要求如下:

(a) 航空器即使在应急着陆时损坏,也应当保护每位乘员在以下情况下免受导致无法撤离的伤害:(1)正确使用设计中规定的安全设备和特性;(2)乘员经受过在应急着陆时可能产生的极限静惯性载荷;(3)可能对乘员产生伤害的座舱内部或其他质量项目,包括动力和电气系统等部件,经受过在应急着陆时可能产生的极限静惯性载荷。

(b) 本条(a)(1)和(a)(2)项规定的应急着陆情况,应当满足以下要求:(1)包括在应急着陆时可能产生的动态情况;(2)乘员经受过因约束或与机内物体接触产生的载荷,不得超过根据人体耐受能力而确定的人体伤害判据。

(c) 在可能的飞行、地面和应急着陆情况下,航空器应当为所有乘员提供保护。

(d) 每个乘员保护系统应当能够实现其预期功能,且不能产生对乘员造成二次伤害的危害。不使用时,乘员保护系统不得妨碍乘员撤离或干扰航空器运行。

(e) 每个行李舱和货舱应当符合下列要求:(1)根据其最大装载重量以及按本专用条件确定的飞行和地面载荷情况所对应的最大载荷系数下的临界载荷分布来设计;(2)有措施防止舱内装载物因撞击乘员或移动造成危害;(3)任何操纵装置、电线、管路、设备或附件,如果破坏或损伤可能会影响安全飞行或着陆,则应当加以保护;(4)可能发生的起火不应影响继续安全飞行或应急着陆。

(f) 任何动力和电气系统部件,如破坏或损伤可能会影响安全使用或乘员安全,则应当加以保护。

亿航EH216-S型无人驾驶航空器系统专用条件确定的安全水平与有人驾驶的小飞机适航标准相当。在EH216-S航空器应急着陆坠撞安全方面,CAAC审查组开展了条款的符合性验证工作,其中包含多个科目的地面试验。

2023年12月,CAAC针对沃飞长空AE200-100型电动垂直起降航空器,发布了首个有人驾驶的eVTOL项目专用条件《关于就沃飞长空AE200-100型电动垂直起降航空器型号合格审定项目专用条件征求意见的通知》。在VHS.2270应急情况条款中规定了应急着陆时的乘员保护能力,以及行李舱/货舱的应急着陆要求^[49]。

2023年11月,CAAC针对峰飞科技V2000CG载物无人驾驶航空器发布了《V2000CG型无人驾驶航空器系统专用条件》,根据V2000CG型号的设计特点和运行风险等确定

了适用的适航要求^[50]。在AEC.2235应急着陆情况条款中规定了应急着陆时每个货舱和有效载荷舱应当符合的要求。

1.4 eVTOL 适坠性符合性验证方法

针对传统构型飞机的适坠性一般采用多层级积木式的验证体系,综合采用试验方法、理论方法和数值方法,研究对象涵盖材料、元件、组件、部件和全机等多个层级^[37]。

eVTOL与传统飞机相比,结构构型不同,采用了大量的复合材料,动力系统为电动。因此对于eVTOL的适坠性验证可以分为起落架、地板下部结构、乘员座椅系统、电池系统以及整机5类对象。按照多层级积木式验证体系至少包括材料级、元件级、部件级、整机级等4个层级,如图3所示。

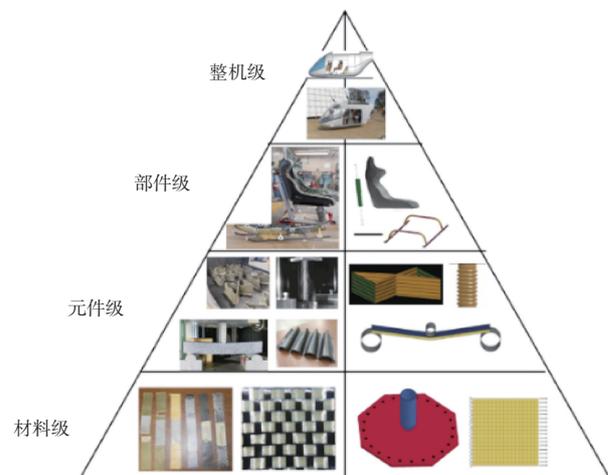


图3 eVTOL 适坠性验证体系

Fig.3 Crashworthiness verification system of eVTOL

材料级主要对机身材料、紧固件、连接件进行力学性能试验,为建立准确的材料本构模型及失效模型提供试验数据,以支持适坠性设计和仿真分析;元件级主要对吸能元件进行试验与分析,分析其变形和失效模式以及吸能特性,验证吸能设计及仿真方法;部件级主要对eVTOL的座椅系统、起落架系统、电池系统进行冲击试验与分析,评估其适坠性;整机级主要对eVTOL全机结构进行坠撞试验和仿真分析,综合评估其适坠性。

2 eVTOL 适坠性设计

2.1 eVTOL 适坠性设计要求

适坠性设计的最终目的是确保乘员安全,而确保乘员安全的耐撞性设计主要有两种方法:事故预防和事故缓解。

事故预防是指设计能够防止事故发生的系统,而事故缓解是指设计能够在事故发生时提供保护的系统。在汽车设计中,事故缓解技术(安全带、气囊、吸能结构等)在过去100年中早已被设计并应用,且其使用受到法规的约束。而汽车原始设备制造商对事故预防的研究则要晚得多。目前,汽车上的事故预防系统(如车道辅助、自适应巡航控制和自动刹车系统等)已成功应用,其目的是防止汽车进入不安全状态。

相比传统的汽车耐撞性设计,eVTOL的适坠性设计难度更大,汽车耐撞性主要考虑前向和侧向碰撞,设计方法和基础理论成熟。而eVTOL的适坠性设计主要考虑垂向碰撞,汽车耐撞性设计中积累的成熟经验和数据已无法满足设计需求,需要借鉴运输类飞机和直升机的抗坠撞设计思路。

一般来说,运输类飞机和直升机在应急坠撞过程中,主要通过飞机客舱下部的机体结构与地面发生剧烈碰撞,以机体结构变形破坏的形式耗散坠撞动能,同时乘员座椅及约束系统也提供一定的保护作用^[37]。典型运输类飞机的机身剖面构型如图4所示,图中 m 指乘员和座椅的等效质量,其中客舱乘员区在坠撞过程中要确保结构完整性,不可发生显著变形而影响乘员生存空间。货舱区、货舱结构过渡区和货舱下部结构区可以进行抗坠撞设计,可通过变形破坏来吸收坠撞能量。直升机坠撞过程中,起落架、机体结构、座椅系统等共同作用,通过变形和失效来耗散坠撞动能,确保乘员足够的生存空间和坠撞载荷不超过乘员耐受极限。

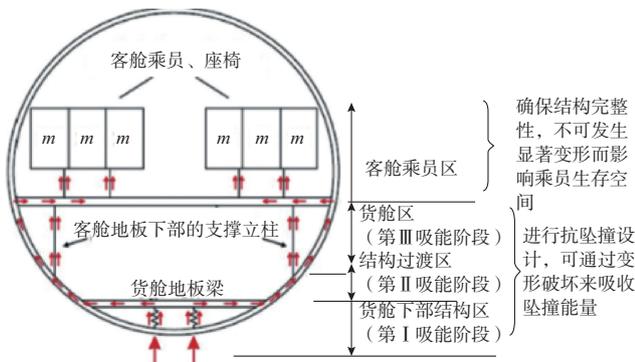


图4 运输类飞机机身剖面构型

Fig.4 Transport aircraft fuselage cross-sectional configuration

与直升机结构类似,eVTOL的结构尺寸小,起落架一般采用不可收放式,在应急坠撞过程中,起落架结构、机体结构以及座椅系统都会参与到飞机的坠撞动能耗散中。典

型的eVTOL坠撞变形如图5所示^[51]。可以看出,在eVTOL坠撞过程中,起落架先撞击地面,发生弯折和断裂,耗散一部分坠撞动能。然后机体下部结构与地面发生撞击,待机身地板下部结构变形破损后,乘员座椅系统进一步发生变形。这三者共同作用可以提供足够的能量衰减,使得当冲击载荷传递到乘员时,冲击力已降到不会造成乘员伤害的水平。

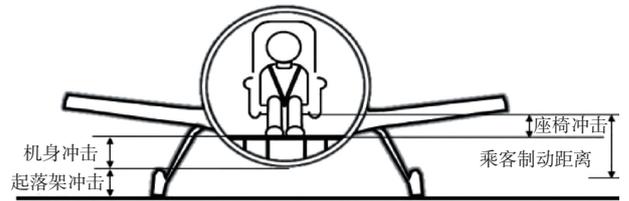


图5 eVTOL的坠撞变形示意图

Fig.5 Schematic diagram of crash deformation for eVTOL

典型滑橇式起落架的eVTOL坠撞时各组件的能量吸收情况如图6所示,可以看出起落架吸收的坠撞能量占比达到57%,机体下部结构的坠撞吸能占比为30%,座椅系统



图6 eVTOL坠撞时各组件的能量吸收

Fig.6 Energy absorption of each component during eVTOL crash

吸收的坠撞动能最少。当然,对于不同构型的eVTOL,其不同组件的坠撞吸能是不同的,这需要在飞行器的适坠性设计中进行优化,以寻求对乘员保护最有利的结果。

飞机结构的抗坠撞性能是机体结构布局设计、刚度设计、强度设计的综合体现。乘员受到伤害是由于机身地板侵入与机体加速度的共同作用^[52]。若机身刚度过低,则随着机身下部结构变形量的增大,客舱地板失效后向客舱的侵入量也变大,随后会造成客舱地板和座椅等结构变形,从而给乘员带来挤压伤害,如图7所示。相反,若机身刚度过高,则坠撞过程中机体加速度会变得较大,使安全带等约束系统对乘员施加的作用力增大,导致发生胸廓骨折,或者因乘员头部与仪表盘或前排座椅猛烈碰撞,导致头部伤害。



图7 eVTOL坠撞变形

Fig.7 Crash deformation of eVTOL

如图8所示,对比分别由碰撞加速度导致的损伤和由碰撞接触导致的损伤与飞机机身刚度间的关系可知^[53],两者影响规律正好相反。因此,在进行eVTOL飞行器机体结构的耐撞性设计时,为同时缓解由加速度和机身变形挤压带来的损伤,要充分考虑多种因素的耦合影响,寻找最优的机身刚度,降低乘员的损伤风险。

因此,对于eVTOL的适坠性设计,需要考虑以下几点要求:(1)应保证起落架与机体连接结构在坠撞过程中不过早破坏,维持起落架结构在坠撞过程中最大程度地发生变

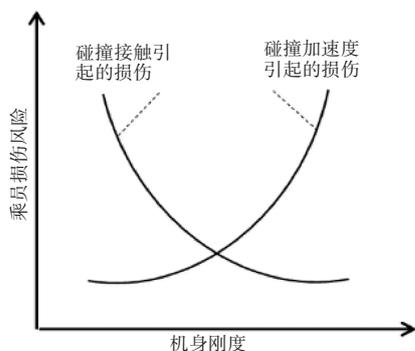


图8 乘员伤害风险受机身刚度的影响关系

Fig.8 The relationship between occupant injury risk and fuselage stiffness

形,以更多地耗散eVTOL的坠撞动能;(2)应保证机身客舱的强度高于机身下部结构的强度,在机身下部结构坠撞变形过程中,机身客舱能够维持较完整的结构空间,乘员不受到严重挤压,确保乘员的可生存空间;(3)机身下部变形压溃区要尽量多地吸收坠撞动能,使传入客舱部分的能量尽可能少,使传递到客舱地板的加速度尽可能小,不超过乘员的耐受极限;(4)乘员座椅及约束系统应具备一定的能量吸收特性,尤其是座椅底部要采取适当的吸能结构设计,降低传递到乘员的坠撞载荷;(5)座椅系统及其与机体结构的连接强度足够,坠撞过程中座椅结构不能发生影响乘员安全的变形和破坏;(6)能源系统(如电池等)在坠撞过程中不能发生燃烧,应采取冲击防护设计。

2.2 典型的eVTOL适坠性设计案例

2.2.1 起落架的坠撞吸能设计

对于大型飞机,起落架经常设计为油气缓冲支柱系统,这是一种两腔油-空气系统,旨在正常着陆情况下减缓冲击载荷,在应急坠撞事件中,起落架系统考虑了耐撞性,可以吸收高达3.7m/s下沉速度的坠撞能量^[54]。

在eVTOL飞行器的适坠性设计中,起落架也能够吸收坠撞冲击能量。坠撞过程中,起落架可以弯曲或塑性变形(类似于图9(a)所示)或包含专门设计用于变形或压溃吸能的组件,如滑橇起落架使用碳纤维增强复合材料管^[55],如图9(b)所示。

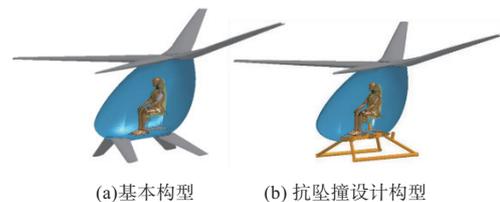


图9 eVTOL飞行器的起落架设计

Fig.9 Landing gear designing of eVTOL aircraft

研究表明,通过在eVTOL设计中使用能量吸收复合材料压缩管和起落架(见图10),可以显著降低乘员受伤的风险。此外,使用碳纤维作为结构材料,可以显著减轻重量(质量),同时保持与铝合金结构相似的乘员载荷^[55]。

此外,在飞行器机身和起落架之间还可以设计吸能缓冲结构,以辅助耗散起落架在撞击过程中的能量。吸能缓冲结构(如复合材料管等)的一端通过一个旋转关节固定在机身上,另一端连接到滑橇起落架的支柱上。这使得吸能缓冲结构能够随着起落架的移动而旋转,限制吸能缓冲结构的剪切载荷。

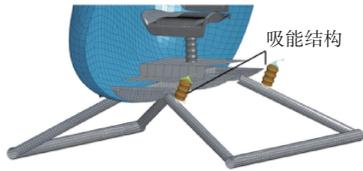
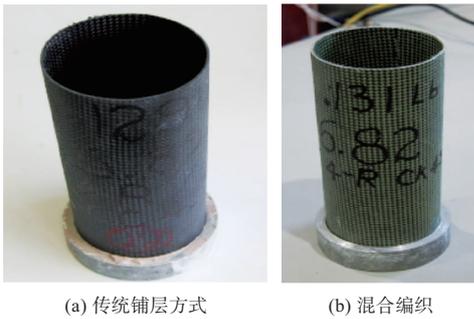


图 10 起落架和机身间的吸能结构

Fig.10 Energy-absorbing structure between landing gear and fuselage

大多数 eVTOL 采用复合材料结构而减轻重量。使用复合材料的主要挑战是碳纤维不具有传统金属材料的延展性,当受到冲击压缩载荷时,会表现出脆性破坏特征,如粉碎、劈裂或剥落等^[56]。美国国家航空航天局(NASA)兰利研究中心探索研究了混合编织复合材料在压缩吸能结构中的应用^[57]。混合编织复合材料样品在经向方向上使用碳纤维,在纬向方向上使用凯芙拉纤维,被制成管状以研究其吸能特性。NASA 将混合编织结构与仅由碳纤维增强复合材料制成的管状样品进行了比较,如图 11 和图 12 所示,混合编织复合材料管具有更好的吸能特性和稳定的压溃变形能力。



(a) 传统铺层方式 (b) 混合编织

图 11 复合材料管

Fig.11 Composite material pipe



(a) 传统铺层方式 (b) 混合编织

图 12 压缩后的结果

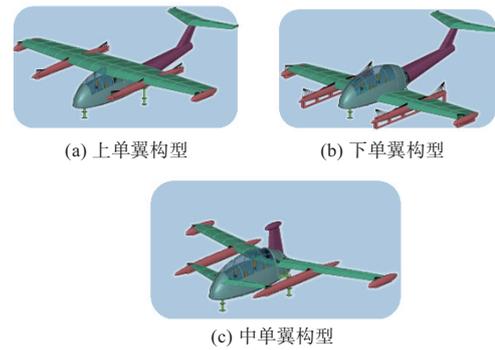
Fig.12 The result after compression

2.2.2 机体结构抗坠撞设计

由于当前电动推进技术的限制,eVTOL 飞行器设计中

要尽可能减轻重量以增加运输能力,这会减少结构优化空间。为确保飞行器的安全性,需要一种能够独立于飞行器结构的吸能组件以提高其耐撞性。目前的研究工作主要是通过开发轻质吸能地板结构来满足这一需求。

eVTOL 机体结构抗坠撞设计中,针对不同的布局形式要采用不同的设计思路。图 13 为上单翼、下单翼和中单翼三种典型的机身布局方式,其中对于上单翼和中单翼构型,主要采用起落架和机身地板下部结构进行吸能缓冲,而对于下单翼构型还可以在机翼下方设计防撞梁,以辅助吸收机体的坠撞动能^[58]。



(a) 上单翼构型 (b) 下单翼构型 (c) 中单翼构型

图 13 不同构型的抗坠撞机身结构设计

Fig.13 Design of anti-crash fuselage structures with different configurations

Waimer 等^[59]提出了一种碳纤维增强复合材料半圆形吸能结构,并集成到地板下部结构中进行了试验评估,如图 14 所示。Delsart 等^[60-61]通过对飞机货舱地板下部布置波纹梁结构,提高了结构能量吸收特性,并进行了试验验证,如图 15 所示。参考文献^[62]提出了采用蜂窝结构布置在机身隔框底部吸收冲击动能,如图 16 所示。



图 14 货舱地板下部吸能结构

Fig.14 Energy-absorbing structure under the floor of cargo

为研究新型轻质低成本复合材料机身结构的耐撞性能,NASA 于 1997 年开展了为期三年的研究项目,旨在研究一种新型低成本轻质复合材料机身,该复合材料机身结构除了满足常规的结构和飞行载荷外,还需具有较好的抗坠



图 15 机身底部波纹梁吸能结构

Fig.15 Energy absorbing structure of corrugated beam at the bottom of fuselage

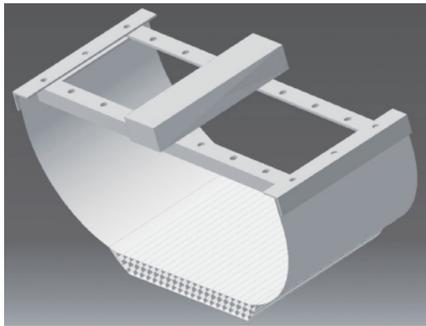


图 16 机身底部蜂窝吸能结构

Fig.16 Honeycomb energy absorbing structure at the bottom of the fuselage

撞性能。NASA 设计了 4 种 1/5 缩比复合材料机身方案,分别采用不同的能量吸收结构,通过试验和仿真分析方法对比了 4 种结构的吸能效率和稳定性,发现泡沫填充结构具有较好的吸能特性^[63],如图 17 所示。

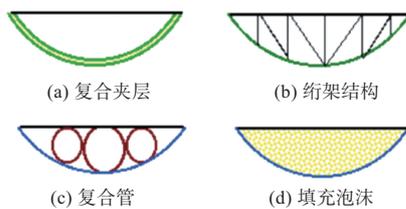


图 17 4 种 1/5 缩比复合材料机身方案

Fig.17 Four schemes of 1/5 scale composite airframe

Alkhatib 等^[64]提出一种双层对接帽形吸能结构设计方法,将其布置在飞机客舱下部,可有效地提高机身的坠撞吸能性能,如图 18 所示。

前面主要是对地板下部的吸能结构设计进行了大量研究,通过改变传统地板下横向隔板的几何形状和材料,提高飞机的耐撞性,减少乘员受载。但是这也会造成在离轴冲击条件下的吸能缓冲效果有所降低,如飞机带有俯仰角和滚转角的坠撞情况。此外,传统的隔板龙骨结构设计对 eVTOL 的重量和空间优化不利。

为了确保 eVTOL 的安全运输,适应各种复杂的运营环

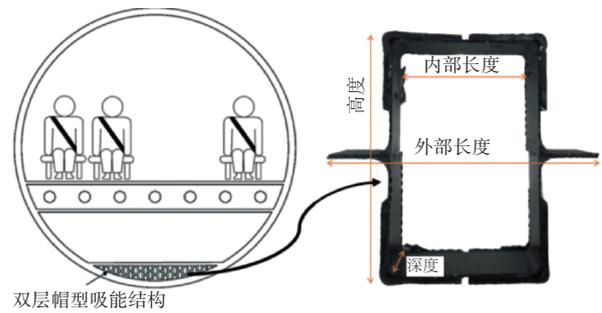


图 18 客舱下部采用双层帽形吸能设计

Fig.18 Double-hat designs used in fuselage subfloor

境,NASA 在开发一种新型吸能结构设计技术,采用可以配置到地板下部空间的小型模块化吸能组件(见图 19),以在这些飞行器的独特设计约束内提高其耐撞性^[57,65]。NASA 在这项研究中开发并评估了三种模块化地板下部吸能结构的几何形状和能量吸收能力。每种吸能组件的几何形状由横向支撑的十字形结构组成。选择十字形结构是为了在不需要飞行器结构支撑的情况下,为吸能组件提供结构刚度,并且在离轴加载下依然具有良好的能量吸收特性。

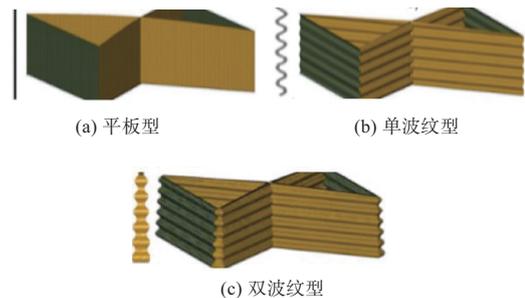


图 19 eVTOL 地板下部吸能组件设计

Fig.19 Design of eVTOL underfloor energy absorption components

吸能组件设计的独立性是该研究的关键,因为它可以允许能量吸收组件在地板空间内独立于飞行器结构进行模块化配置。在吸能组件的顶部设计了曲率,以匹配腹部蒙皮的几何形状,同时降低起始压溃载荷。吸能组件的宽度和长度以近似单个乘员座椅所占的区域为基准。吸能组件高度的选择以适应 eVTOL 坠撞能量吸收分配要求为准。典型的地板下部吸能组件方案如图 20 所示,吸能组件的尺寸可以轻松调整以适应不同的地板空间要求。从图 21 可以看出,采用波纹型吸能组件的坠撞载荷减缓效果更好。

2.2.3 座椅系统抗坠撞设计

一个设计合理的座椅和约束系统是系统级坠撞安全设计的最后一个组成部分。座椅可以发挥双重作用,首先是提供额外的坠撞载荷衰减作用。其次是与约束系统结合,

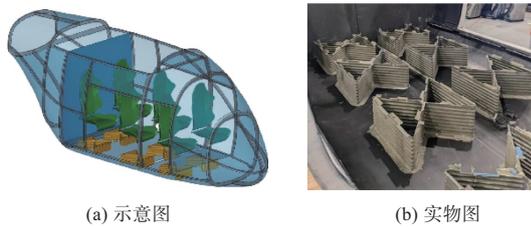


图20 地板下部吸能组件

Fig.20 Energy-absorbing components under the floor



图22 座椅抗冲击设计

Fig.22 Impact-resistant design of seat structure

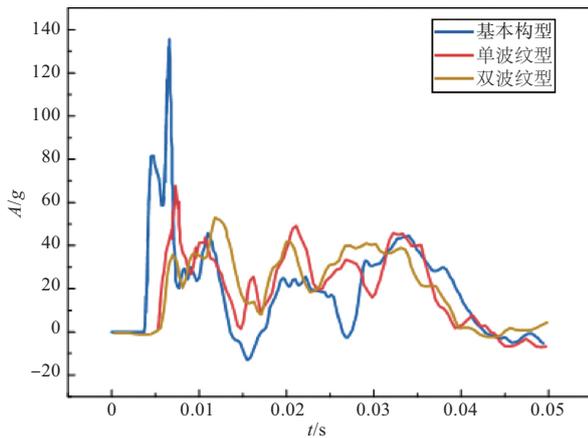


图21 不同吸能组件的坠撞加速度对比

Fig.21 Comparison between crash accelerations for different energy-absorbing components

在坠撞过程中限制乘员的活动,以减少其与内部组件发生二次碰撞的可能性。一个设计合理的座椅,加上正确的约束系统,可以显著提高乘员在坠撞中的安全性。

eVTOL一般设计成2~10座,因此与直升机和运输类飞机类似,在座椅系统抗坠撞设计中需要考虑座椅与飞机的连接、座椅下方的垂向冲击减载等,需要确保在严酷坠撞环境下座椅结构不会发生严重的变形而影响乘员的安全撤离,或对乘员造成直接的挤压伤害。

NASA设计的典型eVTOL座椅如图22所示,在座椅前腿处设计为可压缩的复合材料吸能管,可以稳定地以预定方式折叠变形,减缓坠撞过程中传递到乘员的冲击载荷。后座椅腿提供支撑,在坠撞过程中作为后部座椅的导向,固定在靠背上的支架可以沿着后管移动,使座椅可以随着前椅腿的吸能装置自由压缩。座椅结构使用复合材料,采用经过航空认证的三点安全带作为约束装置。座椅上设计有坐垫和靠垫,主要是提高乘员的舒适性^[66]。

在坠撞过程中安全带需要约束完好,同时不对乘员造成过大的约束载荷,防止对乘员胸部造成挤压损伤。常见的安全带约束方式包括五点式、三点式和两点式等^[67]。五

点式安全带对乘员的约束最强,这也会造成乘员的上躯干受载最大。而两点式安全带对乘员的约束最弱,但乘员上躯干的前后大幅运动可能会造成头部碰撞伤害。

2.2.4 外部保护系统设计

除了飞机结构自身可以通过变形破坏耗散坠撞动能外,飞行器外部的保护系统(如气囊或其他吸能结构组件)也是耗散坠撞动能的重要手段,典型的外部保护结构如图23所示。飞行器外部气囊的功能与内部气囊在汽车中的应用类似。它们在异常情况出现之前一直处于折叠状态。位于飞行器的底部/腹部,在与地面坠撞时展开并通过控制内部气体的排放来起到缓冲作用。典型的气囊使用实例如图23(a)所示^[68],在F-111飞机中,座舱被设计成在紧急情况下与飞机其他部分可分离的形式,作为机组人员的“逃生模块”,并在NASA进行了60次的坠撞测试^[69],以确定在各种冲击角度和速度下,气囊对乘客冲击载荷的衰减效果。

气囊系统的一种潜在替代方案是可压溃的概念,称为可展开能量吸收器(DEA),由NASA的Kellas^[70]开发。该设计采用了由凯芙拉复合材料制成的铰接六角蜂窝结构。DEA设计是通过单元壁的受控折叠模式进行压溃的。在一系列力学和功能测试之后,该DEA系统成功应用于MD500直升机的全尺寸坠毁测试^[71],如图23(b)所示。试验中DEA被配置为展开状态,图23(c)是采用DEA技术后的乘员腰椎载荷测试结果,可以看出DEA技术能够将撞击速度12.2m/s(前向)和7.9m/s(垂直)时的乘员腰椎载荷降低67%^[72]。

为提高直升机的抗坠毁能力,美国军方同样在直升机的机身下部设计了分布式的气囊,并在黏土道面和水面两种环境下对气囊的保护效果做了测试,如图24所示。

3 乘员座椅系统坠撞试验与分析

3.1 乘员座椅系统

eVTOL飞行器发展至今,根据其使用目的的不同已

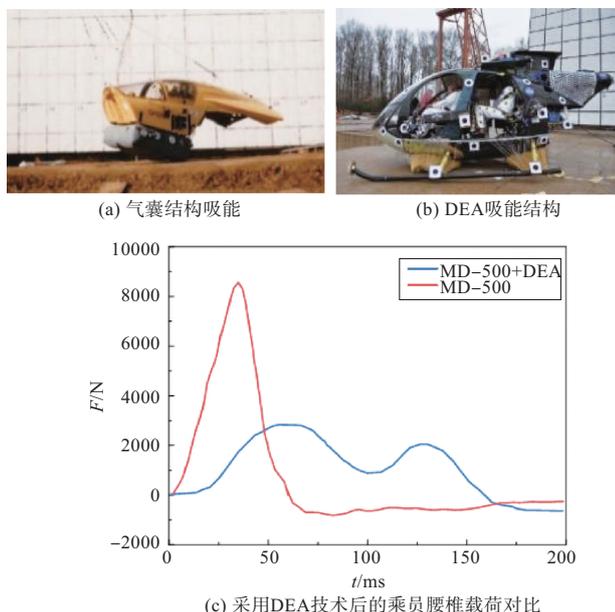


图23 典型的飞行器外部保护结构

Fig.23 Typical aircraft external protective structure

演变出多种构型形式。德宇航^[58]针对一种四座eVTOL建立了带假人及座椅的全机坠撞仿真模型,其中座椅缓冲器采用宏单元模拟,座椅垫采用低密度泡沫模拟,乘员采用LSTC混III型50百分位碰撞测试假人,如图25所示。德宇航分析并提取了垂直坠撞和水平/垂直组合式坠撞过程中,座椅减震器行程、座椅垫变形和乘员腰椎载荷和地板、座椅等的能量吸收,以评估结构的能量吸收及耐撞性。结果表明,垂直坠撞和水平/垂直组合式坠撞过程中的载荷响应、能量吸收和破坏模式具有显著的差异。

NASA建立了不同类型座椅仿真模型。在对这些座椅进行建模时,连接座椅到地板的框架使用刚性连接,将座椅框架材料简化为刚性,并通过一系列座椅垂直落塔跌落试验验证以上简化方法的正确性。结果表明,在测试的每种冲击条件下,座椅底座和地板的加速度计几乎产生相同的结果,如图26所示,因此仿真模型中可以使用地板和座椅底座之间的刚性约束来建模。在相同加载条件和座椅几何形状的情况下,试验测得的复合材料座椅产生的腰椎载荷比铝制座椅高得多,如图27所示^[73-74]。

在此基础上,开展了整机坠撞试验与仿真分析^[73-74],考虑了与地板刚性连接的复合材料座椅和采用复合材料管的吸能座椅,如图28所示。为了提高复合材料管的吸能特性,前期进行了设计优化,通过形状和壳厚度的变化来改善复合材料管的吸能特性^[67,75]。通过整机坠撞试验与仿真分析发现吸能座椅可显著降低假人的腰椎力峰值,



(a) 黏土道面坠撞测试



(b) 水面坠撞测试

图24 直升机的气囊保护方案

Fig.24 Helicopter airbag protection scheme

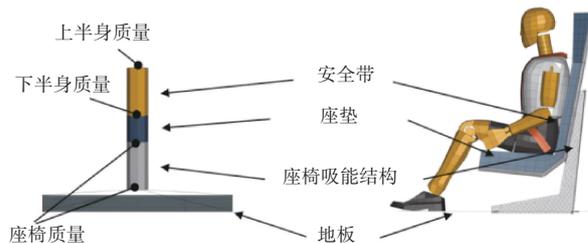


图25 eVTOL的坠撞仿真分析

Fig.25 Crash simulation analysis for eVTOL

如图29所示。同时还研究了座椅行程和地板下能量吸收对测试假人响应的影响,研究结果可为座舱开发和制造提供支持。

3.2 乘员保护分析

在乘员保护分析方面,汽车和航空工业都开发了专用工具来改进乘员安全性。最重要的工具之一是开发了人体模型测试设备(ATD),通常称为碰撞测试假人。ATD使伤害风险预测实现标准化。

NASA一直在努力开发LS-DYNA中的乘员模拟能力,以预测在动态加载条件下航空航天飞行器中乘员的响

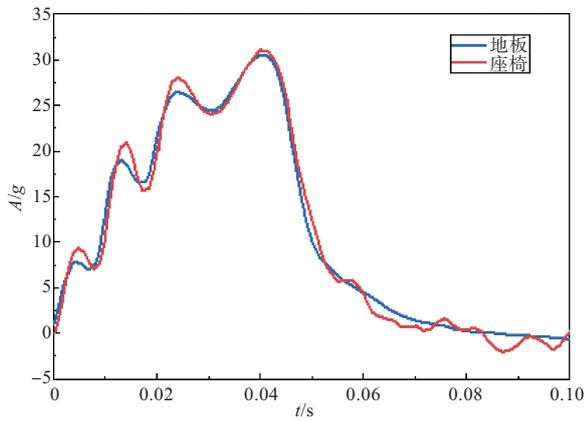


图 26 地板和座椅底座加速度的对比

Fig.26 Comparison between floor and seat base accelerations

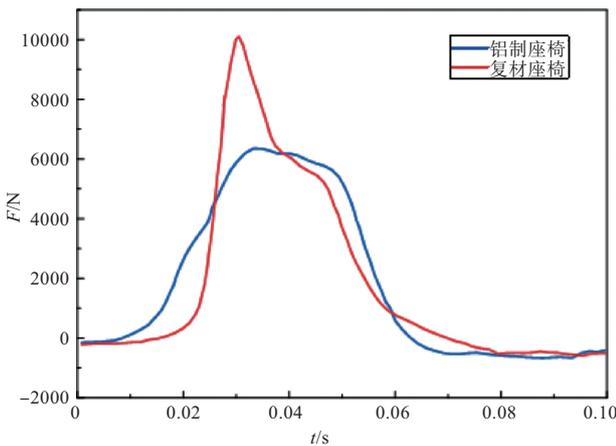


图 27 铝制和复材座椅中假人腰椎力的对比

Fig.27 Comparison between dummy lumbar forces in aluminum and composite seats

应。NASA 开展了一系列的座椅和 ATD 的落塔跌落试验,研究了不同座椅配置对坠撞响应的影响,如图 30 所示。通过获取的测试数据对 ATD 有限元模型的准确性进行验证。测试使用混 III 型 5 百分位、50 百分位和 95 百分位碰撞测试假人进行。测试的座椅包括通用铝合金座椅和复合材料座

椅、商用座椅和 NASA 吸能座椅。根据座椅配置,测试中使用了三点式和四点式安全带^[73]。

为了评估不同类型乘员仿真模型的预测能力,将 LSTC 的混 III 型 5 百分位、50 百分位和 95 百分位仿真假人模型集成到座椅模型中,并将将在地板上测量的加速度—时间曲线作为载荷条件应用于模型,对比了不同仿真假人安装在不同座椅上的腰椎载荷试验与仿真分析结果。结果表明,每种乘员仿真模型都能够较为准确地预测腰椎力峰值响应,腰椎力总体响应形状非常接近^[66,73],如图 31 所示。

在此基础上,开展了整机级的坠撞试验与仿真分析,试验中使用了一个混 III 型 10 岁儿童假人、两个混 III 型 50 百分位假人、一个混 II 型 50 百分位假人、一个混 III 型 5 百分位假人和一个混 III 型 95 百分位假人,如图 32 所示。获取了的各种乘员载荷,并使用包括头部损伤标准(HIC)、颈部损伤标准和腰椎载荷对从测试中获取的数据进行了评估^[66,76-78]。

在仿真分析中也采用相同的假人仿真模型,同时增加了预加载阶段,以适应对重力场和安全带预紧力的模拟。对乘员响应的试验与仿真一致性进行了评估,如图 33 所示^[73-74]。

此外,NASA 为了分析不同安全带约束形式对乘员坠撞响应的影响,建立了基于整机的坠撞仿真模型,在舱内使用 FAA 的混 III 型 50 百分位假人乘员模型。对两点、三点和五点安全带约束进行了建模。与乘员接触的织物被建模为壳单元,卷绕部件被建模为 1D 安全带单元。在 60°和 30°的垂直-水平组合坠撞下,三种安全带约束形式的乘员表现出相似的颈部损伤风险值(见图 34),其中纵坐标代表乘员颈部损伤风险值。应用两点、三点或五点约束方式对颈部压缩载荷几乎没有影响,这是因为颈部压缩载荷发生在 ATD 躯干向前摆动之前的初始冲击中。在三点和五点约束中的 ATD 表现出相似的运动学特性,而用两点约束模拟

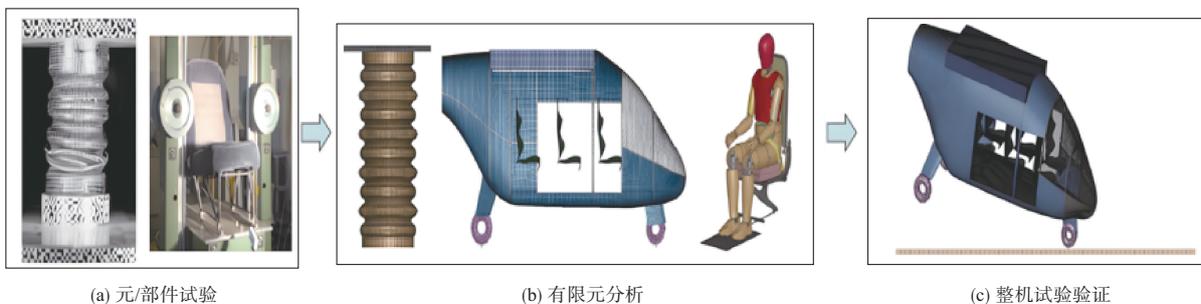
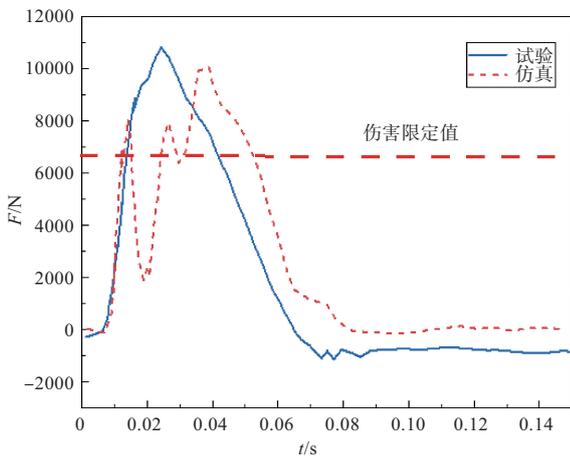
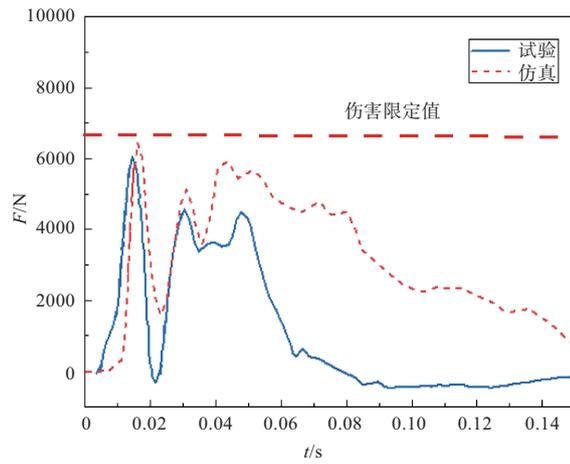


图 28 吸能座椅多层级仿真分析

Fig.28 Multilevel simulation analysis on energy-absorbing seats



(a) 与地板刚性连接的复材座椅



(b) 采用复材管的吸能座椅

图29 座椅形式对乘员响应的影响

Fig.29 The influence of seat configuration on occupant response

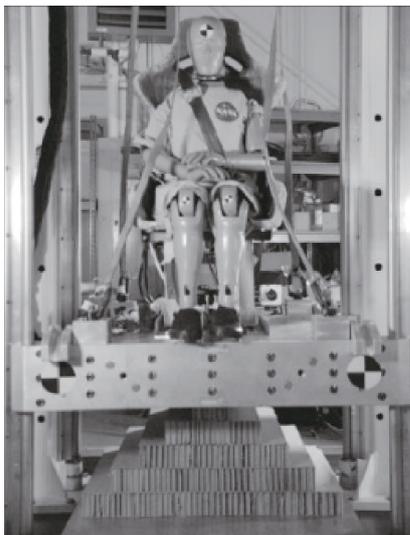
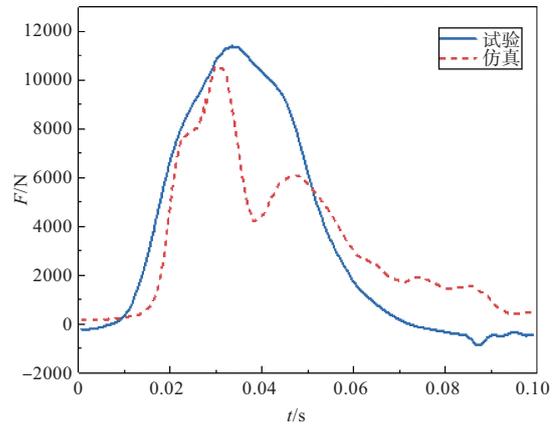
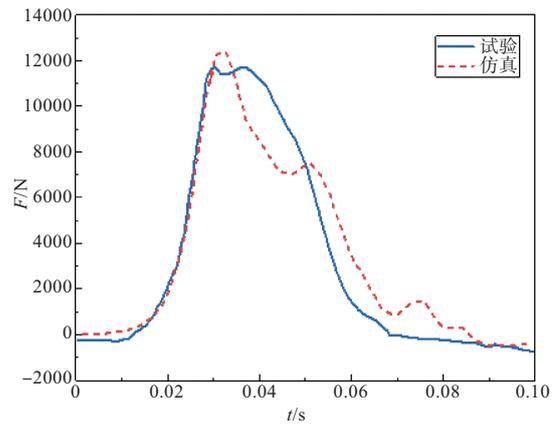


图30 复合材料座椅的冲击试验

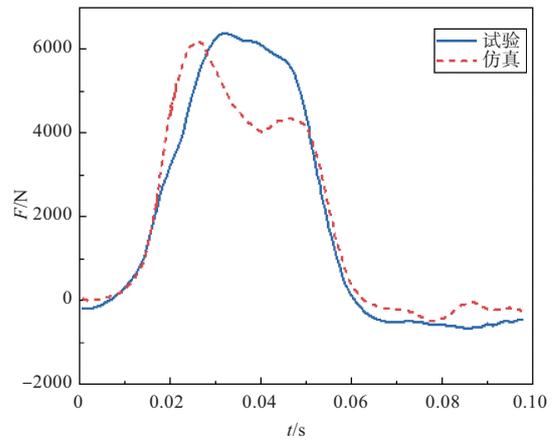
Fig.30 Impact test of composite material seats



(a) 混 III 型5百分位假人



(b) 混 III 型50百分位假人



(c) 混 III 型95百分位假人

图31 ATD假人的腰椎力-时间曲线对比

Fig.31 Comparison between lumbar spine force-time curves between ATD dummies

的ATD表现出更大的前屈,存在因侧倾导致受伤的风险^[67]。

3.3 ATD假人和生物力学假人的对比

混 III 型假人模型是汽车领域和航空领域常用的仿真假人模型,但是随着研究的深入,混 III 型假人模型由于生

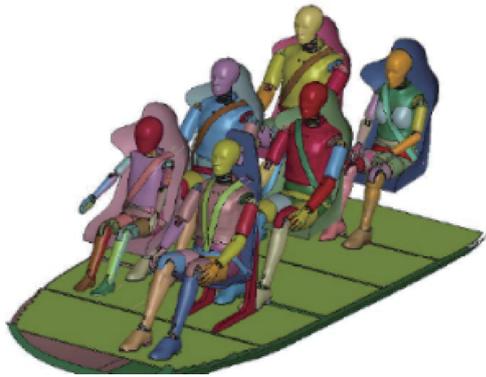


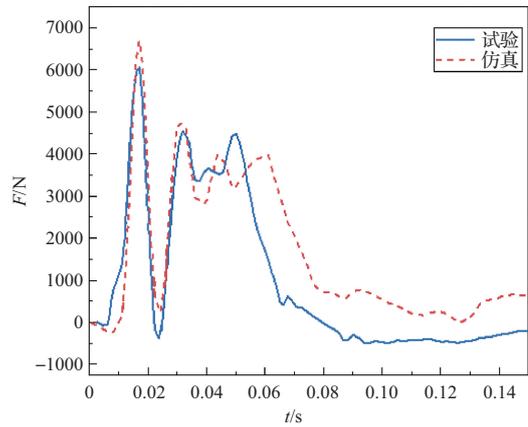
图32 整机坠撞模型中假人布置

Fig.32 Arrangement of dummies in the whole vehicle crash model

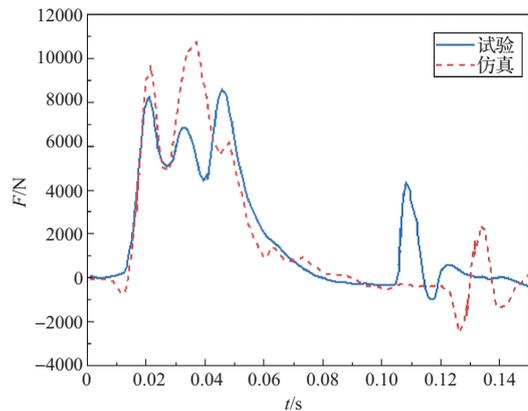
物逼真度与真实人体还存在一定的差距,导致模型在应用上还存在一定的局限性。研究者针对混 III 型假人模型在不同工况下的适用性进行了分析^[79-85]。发现在正向碰撞载荷下,混 III 型假人颈部刚度较为准确,但是在轴向和后向方向,假人颈部的刚度较大,得出的颈部压缩力和力矩偏高;混 III 型假人对速度变化引起的向后或向前旋转加速度变化不敏感,在低载荷和低速碰撞下,混 III 型假人不能很好地替代人类评估颈部损伤;混 III 型假人轴向冲击载荷下,测量得到的小腿力比真实的人体响应要高,大约在 20% 以上。

相较于混 III 型假人模型,生物人体模型可对全身性肌肉骨骼损伤风险进行预测,且在多轴加载下具有较高的生物保真度,同时可以模拟肌肉支撑的影响,但是计算成本较高^[86-87]。

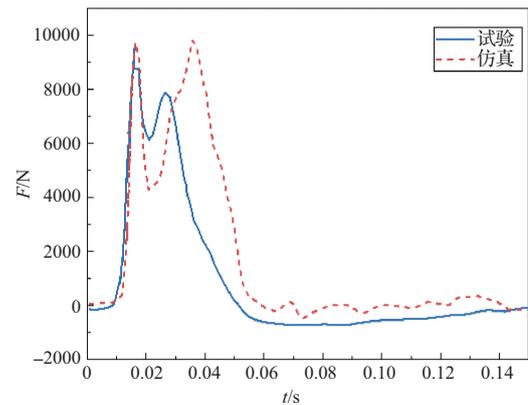
为了进一步提高 eVTOL 的坠撞预测精度,NASA 采用人体模型(HBM)对乘员坠撞响应进行预测。对比分析了混 III 型、人体乘员约束测试装置(THOR)ATD 与虚拟人体模型(THUMS)、全球人体模型(GHBMC)在坠撞环境中的预测能力。如图 35 所示。发现在垂直坠撞环境下,由于 HBM 模型脊柱的灵活性,与 ATD 模型相比,在预测躯干运动学方面存在显著差异。其次,由于 HBM 模型腰椎负荷和躯干屈曲运动会导致头部的撞击。同时对 ATD 和 HBM 的预测的人体损伤风险进行了比较,见表 3。可以看出,ATD 和 HBM 对人体腰椎的损伤风险的预测结果较为一致,在颈部等其他部位损伤风险预测方面存在较为明显的差异。在今后研究中,将采用 HBM 和 ATD 模型进行 eVTOL 坠撞响应预测,评估乘员坐姿变化对预测响应的影响,识别当前 ATD 标准未涵盖的潜在



(a) 混 III 型 50 百分位假人



(b) 混 III 型 95 百分位假人



(c) 混 III 型 50 百分位假人

图 33 整机坠撞 ATD 腰椎力-时间曲线对比

Fig.33 Comparison between ATD lumbar force-time curves in whole vehicle drop tests

伤害源^[86-87]。

4 电池系统坠撞试验与分析

4.1 典型的 eVTOL 储能系统

不同新能源动力方案的优势区间不同,国内外典型的

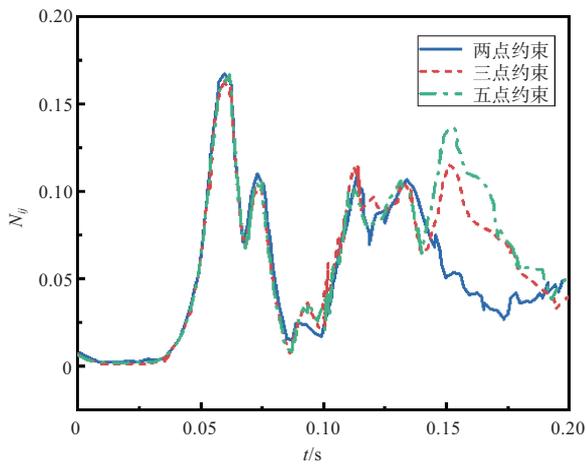


图34 考虑安全带约束形式的坠撞仿真

Fig.34 Crash simulation considering the form of seat belt restraint

eVTOL 动力方案见表4,纯电推动航空器受限锂电池能量密度,适用于载客量10座级以下、航程100km的城市空运市场。氢燃料电池飞机的能源系统复杂度与综合成本大于

表3 ATD 和HBM 模型人体损伤风险预测对比
Table 3 Injury risk predictions compared between ATD and HBM

人体部位	GHBMC	THUMS	ATD
头部	33.94%	3.41%	24.51%
脑部	83.54%	60%	未计算
颈部	1.85%	6.66%	36.88%
腰椎	100%	100%	100%

锂电池,10座以下无显著优势。因此,低载客量的eVTOL是全电推进技术的最佳应用场景。

锂离子电池作为eVTOL飞行器的储能装置,虽然安装时将其放置在飞行器不易变形的部位,但是在应急坠撞过程中一旦遭到外部撞击就极有可能使电池产生破坏而引起短路失效,短时间内释放大量的热,从而会导致热失控、火灾和爆炸等严重影响乘员安全的问题发生^[88-89],严重威胁乘员安全。这就要求研究人员要对锂离子电池的力学特性有准确的认识和较为系统的研究,获得电池在不同碰撞条



图35 ATD 和HBM 模型运动比较

Fig.35 Comparison between ATD and HBM model movements

表4 eVTOL动力方案

Table 4 eVTOL power solutions

国家	公司	型号	动力	续航/km
中国	亿航智能	EH216-S	纯电	30
中国	沃兰特	VE25X1	纯电	200
中国	峰飞航空	盛世龙	纯电	250
中国	小鹏汇天	X2	纯电	75
中国	零重力	ZG-ONE	纯电	30
中国	吉利	TF-1	混动	670
美国	Joby	S4	纯电	240
美国	波音	PAV	纯电	80
德国	Volocopter	Volocopter	纯电	100

件下的力学响应。

4.2 锂电池的冲击性能

电池的碰撞安全一般也是采用多尺度多层次的研究思路,如图36所示,包括电池组分、电池单元、电池模组以及电池系统等^[90]。在微观尺度上的研究工作已经取得了不少成果,参考文献[91]和[92]研究了电池在充放电循环时附着在正负极上的活性材料由自身体积变化引起的断裂和失效等问题。陈建超^[93]从力学角度对黏结剂和隔膜特性进行了分析,研究它们是如何引起电池失效的,还进一步解释了隔膜的拉伸特性与其微观结构的联系。

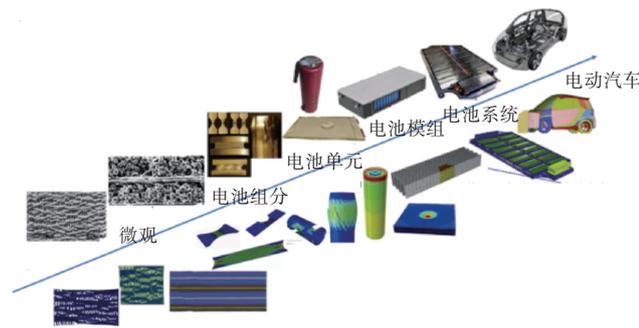


图36 锂离子电池的冲击安全性研究路线

Fig.36 Research route for the impact safety of lithium-ion batteries

针对电池单元的冲击性能,郭亚周等^[94]通过落锤冲击试验方法研究了锂电池在冲击载荷下机械/电学耦合失效特性,分析了不同冲击速度/不同冲击能量下电池内部电压以及温度变化的变化规律,对比研究了不同电量下电池包的破坏模式,如图37所示。刘新华等^[95]试验研究了冲击能量与单体失效模式的关系,发现冲击能量大小与单体的破坏模式密切相关,中等冲击能量对电池产生了最严重的破坏,使电池发生内短路进而诱发热失控。Chen Xiaoping等^[96]开展了锂离子电池在冲击载荷下的动态力学行为研

究,分析了锤头类型、应变率、充电状态等对电池力学性能的影响规律,研究发现电池性能与锤头类型具有较大的关系,电池结构刚度随着冲击速度的增大而增大。Jia Yikai等^[97]研究了压缩和冲击场景下锂离子电池性能的变化,结果发现电池的机械变形以及内部材料失效共同决定了电池的电化学变化,冲击速度越大电池的内短路就越严重。Yamanaka等^[98]通过开发数值模型,精确再现了锂离子电池的钉扎测试,发现探针速度与燃烧风险之间的关系比其与穿透位置的关系更密切。Yang Sheng等^[99]研究了机械加载下电池内部的内短路变化发现,随着电池变形量增大,电池内部的短路会逐渐从软短路演变为硬短路,并且提出了应对电池安全问题的改进措施。

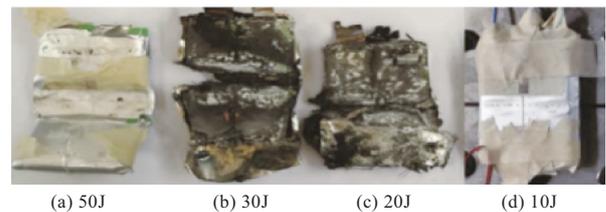
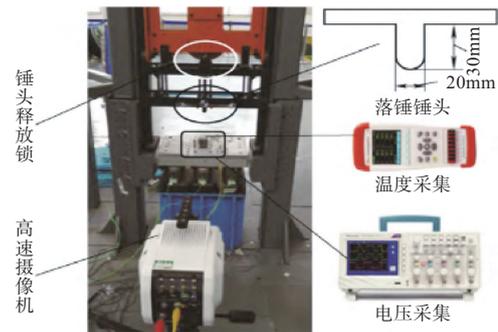


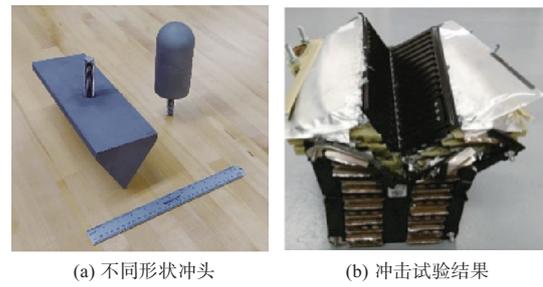
图37 锂离子电池的冲击试验

Fig.37 Impact test of lithium-ion batteries

4.3 电池组的冲击性能

在实际使用过程中,锂离子电池往往是以电池组的形式进行装配,其受力比单体电池更为复杂。康华平等^[100]研究了电池模组在复杂碰撞工况中的力-电响应,分析了加载速度和加载方向对模组内短路热失控的影响,发现电池模组在机械外载下内短路和热失控后引起的起火燃烧与电池模组带电状态(SOC)高度相关,SOC越高越容易发生电池模组起火燃烧,如图38所示。Hu Lingling等^[101]试验研究发现电池组的变形与单个电池有很大的不同,在冲击载荷下,电池组是逐行被压碎的,失效行为与应力波的传播有关,且失效行为是由冲击速度而不是冲击能量决定的,如图39所示。Zhu Feng等^[102]试验研究了加载和边界条件(即压缩速

度、盖板的存在以及冲头的形状)对电池模块响应的影响,如图40所示。为了提高电池组的安全性,胡玲玲等^[103]针对圆柱电池的电池组,提出了一种新型的填充保护方式来提升电池组的耐撞性,通过试验和数值模拟对比了填充电池组与无填充电池组的耐撞性,讨论了采用树脂和不同密度泡沫金属作为填充材料对电池组安全性的影响,如图41所示。Nguyen等^[104]设计了一种具有损伤容限的电池组,通过嵌入圆柱形的可压溃材料来保护电池组。



(a) 不同形状冲头 (b) 冲击试验结果

图40 不同形状冲头对电池组的冲击试验

Fig.40 Impact tests on battery packs with different shaped punches

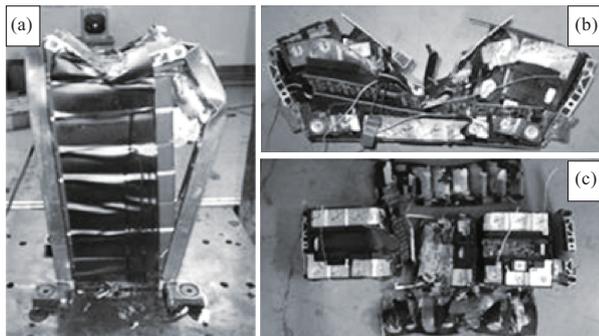


图38 电池模块的冲击试验

Fig.38 Impact test of battery modules

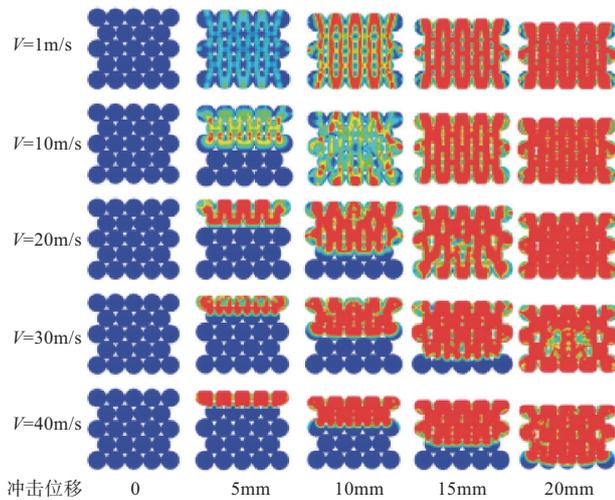
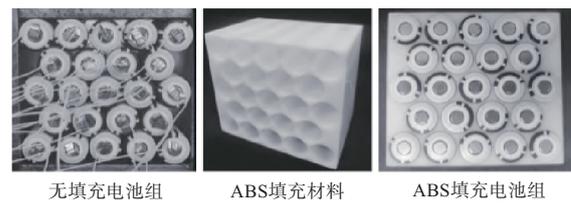


图39 电池组的冲击仿真分析

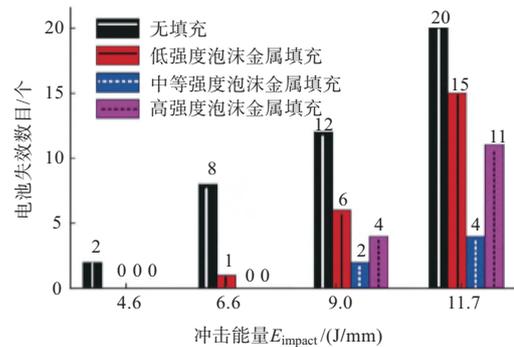
Fig.39 Impact simulation analysis of battery pack

4.4 电池系统的冲击性能

针对电池系统的冲击性能,董晴雯等^[105]采用均质化的建模方法建立包含电池箱体、电池模组、模组固定支架、连接螺钉、电芯连接铜片及其他结构件的精细化电池包有限元模型,进行整车侧面碰撞仿真分析。从车体结构、电池箱体、电池包内部模组等多个层面综合评价了电池包碰撞安全性。Istiyanto等^[106]通过建立电池架正面碰撞、侧面碰撞



(a) 填充电池组与无填充电池组示意图



(b) 有无填充电池组的冲击能量与电池失效数目关系

图41 填充电池组与无填充电池组的耐撞性对比

Fig.41 Crashworthiness comparison between filled battery pack and unfilled battery pack

以及后面碰撞仿真模型分析电池架安全性,对电池架进行优化设计,提高了电池架耐撞性,如图42所示。Kukreja等^[107]建立整车有限元模型进行整车碰撞分析,比较了多个电池组配置,得出使用多功能(耐损伤和能量存储)电池系统可以确保电池安全并有助于整体碰撞中的能量吸收。李宁宁^[108]建立了电池碰撞挤压短路预测有限元模型并将其应用于某电动汽车包括正碰、偏置碰、侧碰及侧面柱碰撞在内的各碰撞工况中,以校核动力电池在碰撞中的短路失效状态。

对于eVTOL,其电池系统受撞击的环境与汽车不同,一般采用自由落体的坠撞试验来对电池系统的耐撞性进行评估。EASA要求对电池及其安装结构开展15.2m坠落试

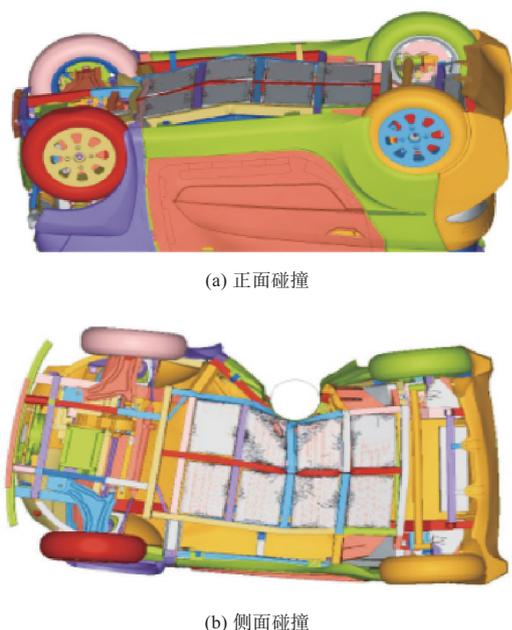


图42 电动汽车碰撞仿真分析

Fig.42 Analysis of electric vehicle collision simulation

验。动力电池在完成试验后 15min 内不得出现漏液、起火、爆炸等现象。如果出现火情或有害气液体、烟雾泄漏,也应将其控制在逃生区域外,从而为乘员提供充足的逃生和被救援时间。国内外多型 eVTOL 的动力电池包均开展过 15.2m 高度垂直撞击水泥地面的测试,如图 43 所示。

5 机体结构坠撞试验与分析

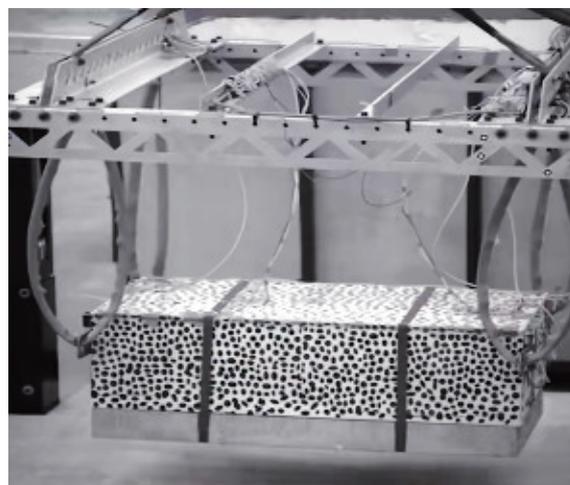
5.1 吸能结构冲击试验与分析

在进行 eVTOL 适坠性设计与分析时,元件、部件等低层级的试验是必不可少的。为了优化机体结构抗坠撞吸能特性,针对复合材料圆管^[57]、轻质圆锥形长梁结构^[109]、手风琴状抗压管件^[67]、十字形吸能组件^[66]、复合材料夹芯板^[74]等元/部件开展了大量的动态压缩以及三点弯等试验。测试了不同构型复合材料吸能元件的吸能和失效特性,分析和验证了不同复合材料铺层、不同混合编织复合材料、不同结构构型等因素对结构吸能的影响规律,如图 44 所示。

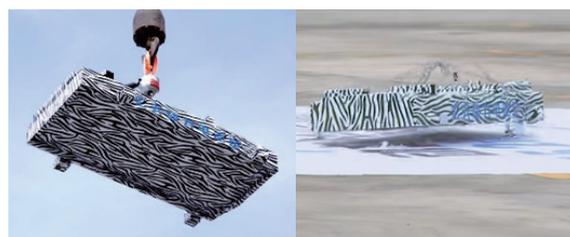
5.2 eVTOL 整机坠撞试验方法

为了验证 eVTOL 的适坠性,确保在发生应急坠撞时能够保护乘员安全,整机坠撞试验是必不可少的。eVTOL 属于小型飞机,针对小型飞机,国内外开展了大量的整机坠撞试验研究,如图 45 所示,试验方法较为成熟^[110-111,71]。

eVTOL 整机坠撞试验一般采用自由落体的原理,按照加载工况可以分为垂直坠撞和垂直-水平组合坠撞两种。



(a) 国外的电池跌落试验



(b) 小鹏汇天的电池跌落试验

图43 电池跌落试验

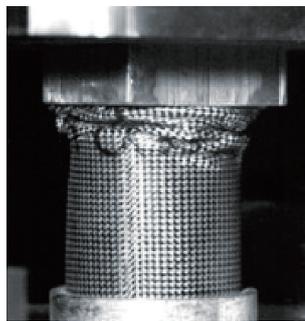
Fig.43 Drop test of the battery

整机坠撞试验为一次性破坏试验,试验过程中需要测量机体撞击地面载荷、关键机体结构的变形和破坏、客舱内部地板过载、座椅约束系统变形、航空假人的坠撞响应等。测量获得的试验载荷及加速度数据一般混杂高频干扰信号,因此对于坠撞试验数据通常需要采用低通滤波的方法进行处理。

为了验证 eVTOL 的抗坠撞性能,校验仿真分析模型,NASA 针对典型六座 eVTOL 进行了整机坠撞试验,获得了 200 多个通道的数据,并收集了 20 多个机载和高速摄像视频数据。得到不同机身位置处的加速度响应,对其抗坠撞性能进行了评估。利用试验数据修正了整机坠撞有限元模型,确保了有限元分析结果的准确性^[74],如图 46 所示。

5.3 eVTOL 整机坠撞数值方法

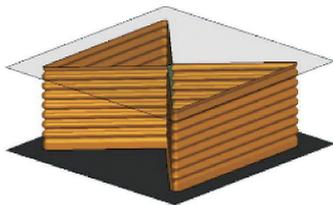
相比于传统飞机,eVTOL 大多采用轻质复合材料。由于其运营环境多为城市等复杂环境,应急着陆时的撞击条件需要综合考虑飞机的撞击速度、撞击姿态、地面环境等因素。除了整机坠撞试验外,还需要通过仿真分析方法,评估不同构型和不同坠撞条件下 eVTOL 的坠撞响应,进行适坠性评价和结构优化设计。



(a) 复合材料圆管^[57]



(b) 轻质圆锥形长梁结构^[109]



(c) 十字形吸能组件^[67]



(d) 手风琴状抗压管^[66]



(e) 复材夹芯板

图 44 典型吸能元/部件结构及吸能特性

Fig.44 Typical energy-absorbing element/component structure and energy-absorbing characteristics



(a) 赛斯纳172^[110]



(b) Cirrus SR-20飞机^[111]



(c) MD-500^[71]



(d) eVTOL^[111]

图 45 整机坠撞试验方法

Fig.45 Full-scale crash test method



(a) 正面变形对比



(b) 侧面变形对比

图 46 修正后的 eVTOL 有限元模型分析结果

Fig.46 Analysis results of the revised eVTOL finite element model

5.3.1 不同构型 eVTOL 的坠撞仿真分析

针对不同构型 eVTOL 的抗坠撞性能,德宇航针对上单翼、下单翼和中单翼三种典型的 eVTOL 机身布局构型,对坠撞性能进行了坠撞仿真分析研究,分析结果如图 47 和图 48 所示。发现由于机翼限制了起落架及客舱下部结构的变形吸能,下单翼构型飞机会导致客舱内产生过大的冲击载荷。而上单翼飞机相比于其他两种构型飞机,相同工况下主框架轴向力更大,客舱坍塌的风险更大。当考虑滚转角工况时,对于下单翼构型飞机,会产生严重的二次冲击,导致较大的过载产生^[58]。

5.3.2 不同条件下 eVTOL 的坠撞仿真分析

针对不同坠撞条件下 eVTOL 的坠撞性能,NASA 开展了不同冲击速度、地面环境、飞机姿态等因素下的坠撞仿真分析研究^[12],采用的仿真分析模型如图 49 所示。发现在相同坠撞速度下,相比于混凝土等较硬的地面环境,土壤地面坠撞时会使飞机起落架陷入地面(见图 50),限制飞机水平运动,从而产生较高的水平加速度。俯仰角向下的坠撞工

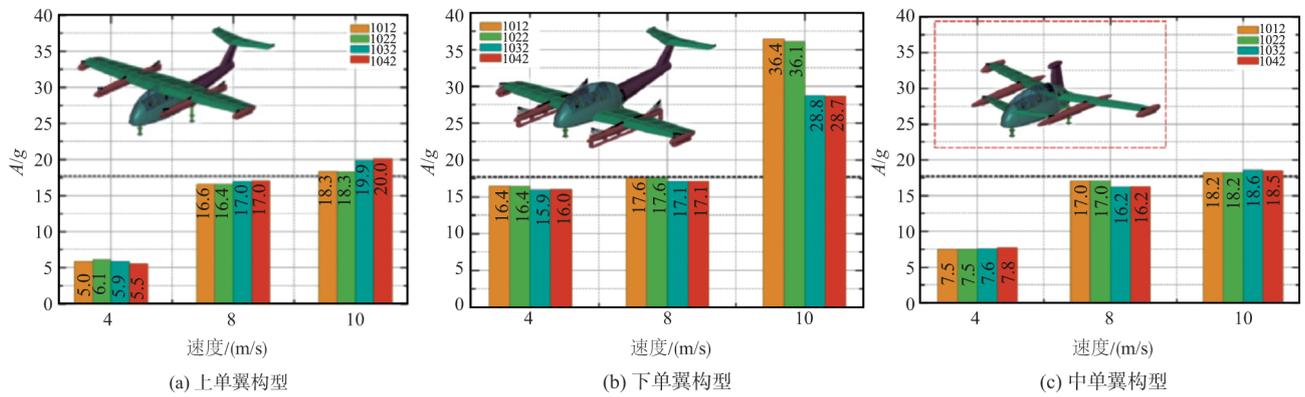


图47 不同机翼构型下结构的加速度

Fig.47 Structural acceleration under different wing configurations

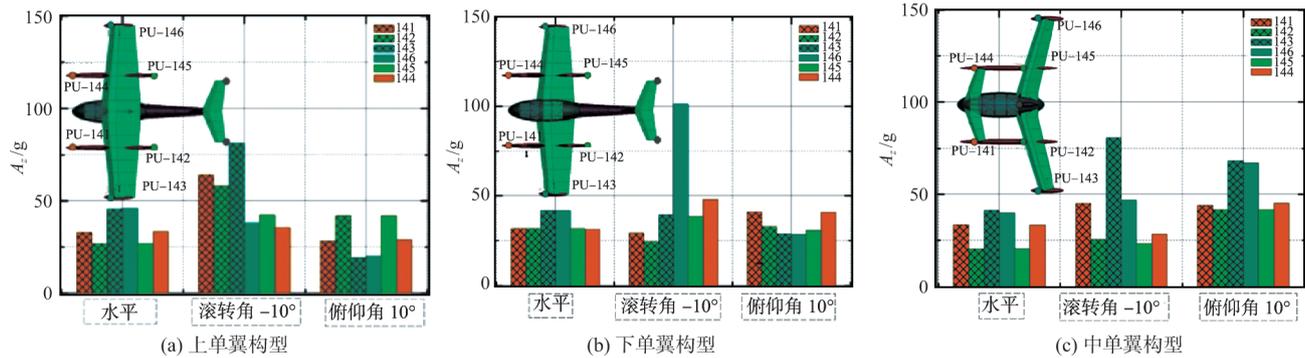


图48 姿态角对结构加速度的影响

Fig.48 The effect of attitude angles on structural acceleration

况会使机体产生较大的水平和垂直加速度(见图51)。

德宇航^[58]针对 eVTOL 在不同坠撞条件下结构吸能和乘员安全问题,以典型上单翼 eVTOL 为对象,对比分析了垂直坠撞和考虑水平速度—土壤环境—滚转角等多因素影响的机体结构坠撞吸能和乘员响应,计算结果如图 52 所示。发现不同工况下机体结构坠撞吸能过程显著不同,垂直坠撞工况下 eVTOL 结构吸能顺序为起落架—机体下部结构—座椅系统,而考虑飞机水平速度和带有姿态角坠撞工况下,存在起落架—机体下部结构—座椅系统同时吸能的状况。相比于理想的垂直坠撞工况,其他坠撞工况下乘员的过载更高,安全风险更大。

5.3.3 eVTOL 适坠性优化与分析

针对 eVTOL 结构吸能优化问题,丁梦龙等^[2]针对典型构型 eVTOL,对其滑撬式起落架和吸能元件进行了适坠性优化设计,将优化后的部件组装进行了整机适坠性分析,研究了多角度、多速度和不同摩擦条件的坠撞响应,如图 53 所示,通过加入合理优化后的起落架和吸能元件,可使 eVTOL 坠撞时乘员的腰椎受力和头部损伤判据 HIC 值均

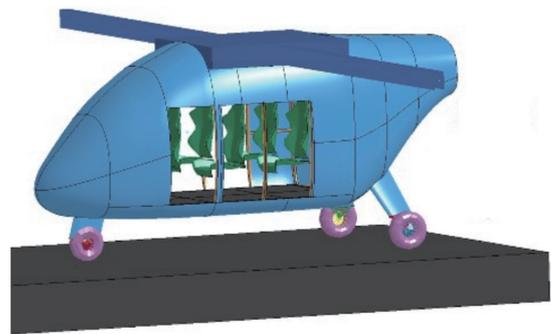


图49 用于参数敏感性分析的 eVTOL 模型

Fig.49 eVTOL model for parameter sensitivity analysis

有显著减小。此外,在离轴坠撞条件下的乘员腰椎有很大受伤风险,座舱有很大风险会因为地面摩擦力和大质量部件的惯性力导致剪切破坏以致溃塌。

韩云等^[113]建立了 eVTOL 基础构型有限元模型,在此基础上通过引入负泊松比蜂窝吸能结构与碳纤维/芳纶纤维复合材料吸能结构,对两种构型进行了 9.14m/s 垂直坠撞仿真分析,如图 54 所示,发现 eVTOL 的主要变形与吸能部件

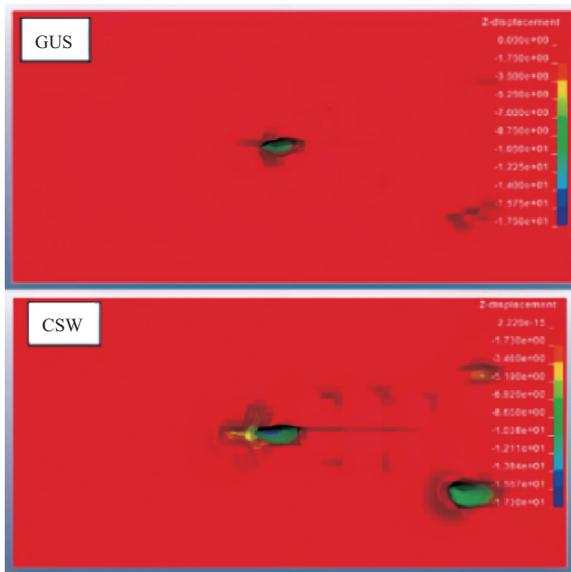
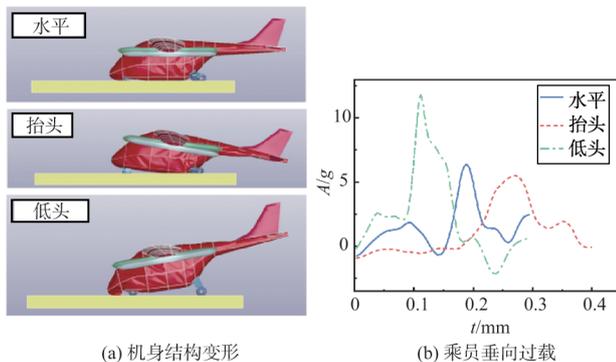


图50 撞击土壤地面的凹陷变形

Fig.50 The indentation deformation of the soil ground caused by impact



(a) 机身结构变形

(b) 乘员垂向过载

图51 土壤环境下的坠撞仿真分析结果

Fig.51 Simulation results under soil runway crash

是腹部结构、蒙皮以及吸能管,三个部件吸能占整体的75%以上。与基础构型相比,引入吸能材料后乘员所受腰椎载荷峰值降低49%左右。

6 结论与挑战

6.1 结论

eVTOL是我国发展低空经济的重要引擎,安全性是eVTOL最基本的要求,适坠性设计与验证是eVTOL研制中的关键技术之一。适航标准和咨询通告对eVTOL的适坠性做出了明确规定,主要是避免乘员承受过于严酷的加速度和载荷,保持乘员的生存空间,以及维持乘员应急撤离通道的可用和防止坠撞后起火燃烧等。起落架和地板下部

结构吸能、乘员座椅系统的吸能缓冲和抗冲击、电池系统的冲击试验与分析、机身结构的抗坠撞和能量吸收设计方法以及适坠性试验与数值评估方法是eVTOL适坠性研究中的关键问题。主要研究结论如下:

(1)对于适航要求和验证方法,介绍了CCAR-23部、CCAR-27部等关于应急着陆静力条件和动载条件的规定,分析了国内外多个eVTOL型号的适坠性专用条款以及积木式多层级的适坠性符合性验证思路。

(2)对于起落架和地板下部结构吸能,介绍了抗坠撞起落架设计、新型吸能结构设计、模块化吸能结构分析与验证评估等研究工作,表明起落架和地板下部结构在坠撞过程中的能量吸收占主导作用,且采用吸能设计后可显著提高eVTOL的适坠性,提高乘员保护能力。此外,还可以在机身下部设计气囊、蜂窝等吸能结构,进一步降低机身与地面的坠撞载荷。

(3)对于乘员座椅系统,座椅的椅腿、椅盆等结构可以采用吸能设计,座椅下方也可以布置一定的蜂窝等吸能结构,进一步降低乘员所受的坠撞冲击载荷。对于乘员的安全性,安全带的约束方式对乘员坠撞运动过程和受载有显著影响,可采用ATD假人和生物力学假人进行人体冲击损伤分析评估。

(4)对于电池系统,介绍了包括电池组分、电池单元、电池模组以及电池系统等多尺度多层级的冲击试验与仿真分析研究工作,对于电池系统要开展15.2m坠落试验。

(5)对于全尺寸机身结构,坠撞试验和数值模拟方法是机身结构适坠性评估的主要方式。坠撞试验包括垂直坠撞和水平-垂直速度组合式坠撞,可采用自由落体和摆锤式加载方法。数值方法在eVTOL适坠性研究中得到了广泛的应用,研究重点在于高精度的数值建模方法以及各种复杂撞击环境下结构的响应评估与适坠性优化等。

6.2 挑战

针对eVTOL的发展趋势和结构安全要求,在适坠性适航审定与符合性验证、适坠性设计、仿真分析、坠撞试验与评估等方面还存在诸多技术挑战。

(1)适坠性适航审定与符合性验证方面:不同类型eVTOL的适坠性审定方法、符合性验证方法和判据、适坠性审定指南、适坠性试验标准规范等。

(2)适坠性设计方面:分级可控的适坠性优化设计方法、标准化的吸能元件设计、可替换模块化吸能组件设计、轻质低成本抗坠撞起落架设计、轻质复合材料抗坠撞座椅及乘员约束系统设计、乘员系统抗冲减载优化设计、电池系

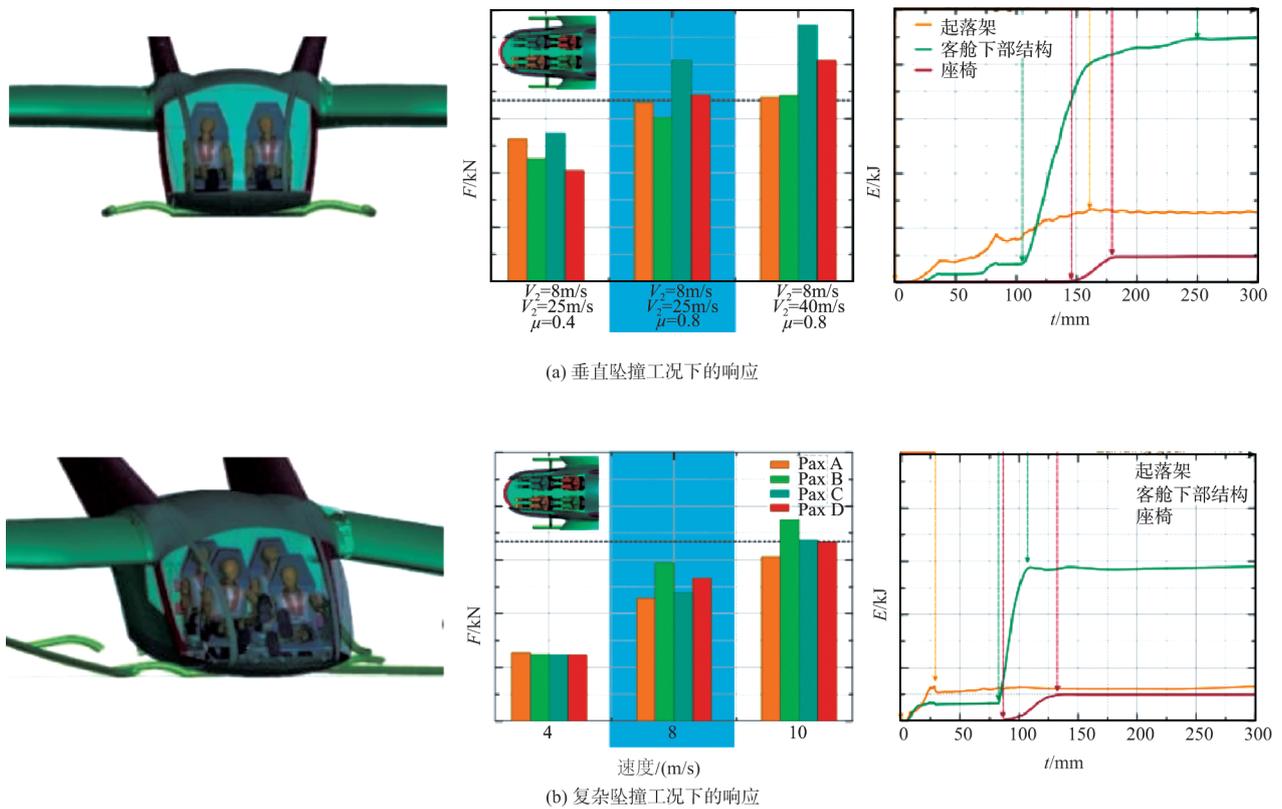


图 52 不同工况下结构吸能与乘员响应对比

Fig.52 Comparison between structural energy absorption and occupant response under different conditions

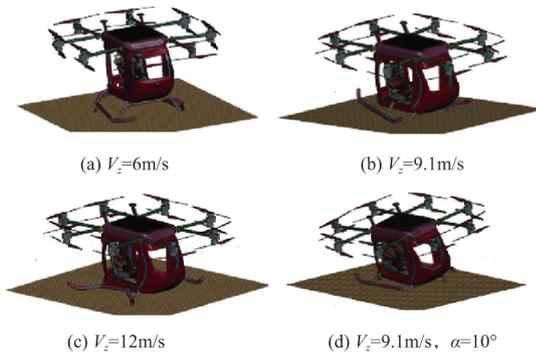


图 53 不同工况的坠撞仿真分析

Fig.53 Crash simulation under different conditions

统冲击防护设计、坠撞可生存的 eVTOL 电池-机体结构一体化设计、抗离轴坠撞的一体化机体结构设计等。

(3) 适坠性试验方面: eVTOL 垂直-水平组合速度坠撞试验技术、姿态可控的离轴坠撞试验技术、电池系统坠撞试验技术、复杂地面环境模拟技术、水面和冰面的坠撞试验技术、起落架系统坠撞试验技术、基于水平滑台的全机应急着陆冲击试验技术、座椅乘员约束系统坠撞试验技术、复杂载荷下的吸能结构冲击试验等。

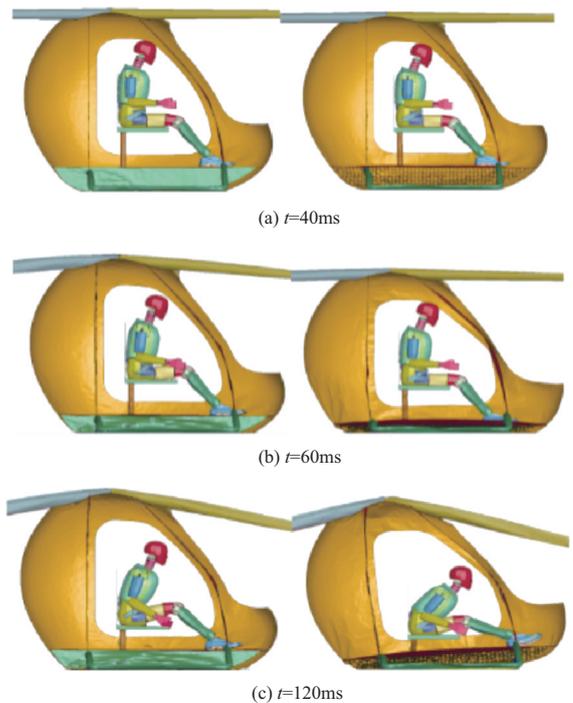


图 54 基础构型与优化构型的坠撞变形对比

Fig.54 Comparison of crash deformation between basic configuration and optimized configuration

(4)适坠性仿真分析方法:电池系统热失控行为高效和精准模拟、电池系统多尺度耦合分析方法、基于生物力学人体模型的全机适坠性分析、水平-垂直速度组合坠撞分析、离轴坠撞分析、复杂地形下的坠撞分析、坠撞安全包线分析等。

(5)适坠性评估方面:eVTOL 适坠性综合评估方法和评估模型、基于生物力学的乘员安全评估方法和指标、结构修理后的适坠性评估方法、适坠性快速评估工具等。

AST

参考文献

- [1] Goyal R, Reiche C, Fernando C, et al. Advanced air mobility: Demand analysis and market potential of the airport shuttle and air taxi markets [J]. *Sustainability*, 2021, 13: 7421.
- [2] 丁梦龙, 李道春, 周尧明, 等. eVTOL 适坠性分析及优化[J]. *航空学报*, doi:10.7507/1s1000-6893.2024.31282.
Ding Menglong, Li Daochun, Zhou Yaoming, et al. Crashworthiness analysis and optimization for eVTOL vehicles [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, doi: 10.7507/1s1000-6893.2024.31282. (in Chinese)
- [3] 范耀宇. 民用运输飞机适坠性要求浅析[J]. *民用飞机设计与研究*, 2014(2):31-33.
Fan Yaoyu. Analysis of crashworthiness requirements of civil transport aircraft[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2014 (2): 31-33. (in Chinese)
- [4] Logue T V, Mcguire R J, Reinhardt J W, et al. Vertical drop test of a narrow-body fuselage section with overhead stowage bins and auxiliary fuel tank system on board[R]. DOT/FAA/CT-94/116, 1995.
- [5] Le P F, Carcianta R. A320 fuselage section vertical drop test, Part 2: test result[R]. S955776/2, 1995.
- [6] Kumakura I, Minegishi M, Iwasaki K, et al. Summary of vertical drop tests of YS-11 transport fuselage sections[C]. *World Aviation Congress*, 2004.
- [7] Abramowitz A, Vu T, Smith T. Vertical drop test of a narrow-body transport fuselage section with a conformable auxiliary fuel tank onboard[R]. DOT/FAA/AR-00/56, 2000.
- [8] Fasanella E L, Jackson K E. Crash simulation of a Boeing 737 fuselage section vertical drop test[R]. 20040086069, 2004.
- [9] Jackson K E, Fasanella E L. Crash simulation of vertical drop tests of two Boeing 737 fuselage sections[R]. DOT/FAA/AR-02/62, 2002.
- [10] Gyida M, Marulo F, Abrate S. Advances in crash dynamics for aircraft safety[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 98: 106-123.
- [11] Rassaian M. Virtual test and simulation[C]. *AIAA Complex Aerospace Systems Exchange*, 2013: 1-25.
- [12] Hachenberg D, Lavinge V, Mahe M. Crashworthiness of fuselage hybrid structure[C]. *8th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference*, 2016: 1-16.
- [13] Reed W H, Robertson S H, Weinberg L W T, et al. Full-scale dynamic crash test of a Lockheed Constellation model 1649 aircraft[R]. FAA-ADS-38, 1965.
- [14] Reed W H, Robertson S H, Weinberg L W T, et al. Full-scale dynamic crash test of a Douglas DC 7 aircraft[R]. FAA-ADS-37, 1965.
- [15] Abramowitz A, Ingraham P A, Mcguire R. Vertical drop test of a shorts 3-30 airplane[R]. DOT/FAA/AR-99/87, 1999.
- [16] Jackson K E, Fasanella E L. Development of an LS-DYNA model of an ATR42-300 aircraft for crash simulation[C]. *ICRASH-International Crashworthiness Conference*, 2004: 1-15.
- [17] Discovery Channel. Curiosity: the plane crash 2012[EB/OL]. (2012-08-10). <https://curiosity.com/paths/ahistoric-crash-curiosity-plane-crash-discovery/ref=ptv#a-historic-crash-curiosity-plane-crash-discovery>.
- [18] Littell J D. A summary of airframe results from a Fokker F28 full-scale crash test[R]. NASA/TM 2020-220572, 2020.
- [19] 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 Engineering*, 2019, 131: 140-151.
- [20] 葛宇静, 白春玉, 惠旭龙, 等. 材料中应变率力学性能测试数据处理与表征方法[J]. *测控技术*, 2022, 41(5):58-65.
Ge Yujing, Bai Chunyu, Xi Xulong, et al. Test data processing and characterization methods for material mechanical properties under intermediate strain rates[J]. *Measurement & Control Technology*, 2022, 41(5): 58-65. (in Chinese)
- [21] Ren Tengfei, Wang Cunxian, Hou Bing, et al. Analytical models for characterizing coupling effects of loading state and

- loading rate on ultimate strength and yield strength of riveted joints[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 279: 112387.
- [22] Rayhan S B, Pu Xue. Crashworthiness study of a newly developed civil aircraft fuselage section with auxiliary fuel tank reinforced with composite foam[J]. *Aerospace*, 2023, 10(3): 314.
- [23] Rayhan S B, Pu Xue. A case study on the effect of uncertain impacts of a civil aircraft fuselage section with auxiliary fuel tank[C]. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2021.
- [24] 冯振宇, 程坤, 赵一帆, 等. 运输类飞机典型货舱地板下部结构冲击吸能特性[J]. *航空学报*, 2019, 40(9): 222907.
- Feng Zhenyu, Cheng Kun, Zhao Yifan, et al. Energy absorbing characteristics of typical subcargo fuselage section of a transport category aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(9): 222907. (in Chinese)
- [25] 张欣玥, 惠旭龙, 葛宇静, 等. 中低速压缩加载下不同截面构型复合材料薄壁结构吸能特性及失效分析[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(6): 36-49.
- Zhang Xinyue, Xi Xulong, Ge Yujing, et al. Energy absorption characteristics and failure analysis of composite thin-walled structures with different cross-sectional configurations under medium- and low-speed compression loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(6): 36-49. (in Chinese)
- [26] 葛宇静, 白春玉, 舒挽, 等. 一种复合材料结构的坠撞吸能特性分析[J]. *飞行器强度研究*, 2021(1): 50-55.
- Ge Yujing, Bai Chunyu, Shu Wan, et al. Analysis on the crash energy absorption characteristics of a composite structure[J]. *Structure and Strength Research*, 2021(1): 50-55. (in Chinese)
- [27] 白佳瑶, 黄金红, 侯兵, 等. 不同压溃速度下复合材料圆管吸能特性试验及数值模拟研究[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(12): 66-73.
- Bai Jiayao, Huang Jinhong, Hou Bing, et al. Experimental and numerical simulation research on the energy absorption properties of composite circular tubes at different impact velocities[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(12): 66-73. (in Chinese)
- [28] 冯振宇, 刘旭, 林岚辉, 等. 安全带对航空座椅及乘员冲击响应的影响[J]. *航空学报*, 2022, 43(1): 224808.
- Feng Zhenyu, Liu Xu, Lin Lanhui, et al. Impact of seatbelts on impact characteristics of aviation seats and occupants[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(1): 224808. (in Chinese)
- [29] 解江, 马士成, 贺永龙, 等. 水平冲击下头排乘员损伤及保护姿势研究[J]. *航空学报*, 2020, 41(5): 223489.
- Xie Jiang, Ma Shicheng, He Yonglong, et al. Research on injury and brace position for front-row occupant under horizontal impact [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(5): 223489. (in Chinese)
- [30] 杨欢, 刘小川, 白春玉, 等. 典型航空座椅/乘员系统水平冲击特性实验[J]. *航空学报*, 2022, 43(6): 526238.
- Yang Huan, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Experiment on longitudinal dynamic characteristics of typical aircraft seat/occupant system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(6): 526238. (in Chinese)
- [31] 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)
- [32] Tang Huan, Zhu Shuhua, Liu Xiaochuan, et al. Impact of crash environments on crashworthiness of fuselage section[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2022, 39(S1): 1-8.
- [33] 张欣玥, 惠旭龙, 刘小川, 等. 典型金属民机机身结构坠撞特性试验[J]. *航空学报*, 2022, 43(6): 526234.
- Zhang Xinyue, Xi Xulong, Liu Xiaochuan, et al. Experimental study on crash characteristics of typical metal civil aircraft fuselage structure[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(6): 526234. (in Chinese)
- [34] 刘小川, 张欣玥, 惠旭龙, 等. 结构修理对民机机身耐撞性的影响[J]. *航空学报*, 2023, 44(10): 227517.
- Liu Xiaochuan, Zhang Xinyue, Xi Xulong, et al. Study on the influence of structural repair on the crashworthiness of civil aircraft fuselage[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(10): 227517. (in Chinese)
- [35] Rayhan S B, Pu Xue, Xi Xulong. Modeling of fuel in aircraft

- crashworthiness study with auxiliary fuel tank[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173: 104449.
- [36] 刘小川, 惠旭龙, 张欣玥, 等. 典型民用飞机全机坠撞实验研究 [J]. *航空学报*, 2024, 45(5): 385-405.
Liu Xiaochuan, Xi Xulong, Zhang Xinyue, et al. Full-scale crash experimental study of typical civil aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(5): 385-405. (in Chinese)
- [37] 刘小川, 白春玉, 惠旭龙, 等. 民机机身结构耐撞性研究的进展与挑战[J]. *固体力学学报*, 2020, 41(4): 293-323.
Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, Xi Xulong, et al. Progress and challenge of research on crashworthiness of civil airplane fuselage structures[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2020, 41(4): 293-323. (in Chinese)
- [38] 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(3): 1-14.
Liu Xiaochuan, Wang Binwen, Bai Chunyu, et al. Progress and prospect of aviation structure impact dynamics[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(3): 1-14. (in Chinese)
- [39] 牟浩蕾, 解江, 冯振宇. 民机机身结构适坠性研究[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(3): 17-39.
Mu Haolei, Xie Jiang, Feng Zhenyu. Research on crashworthiness of civil aircraft fuselage structures[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(3): 17-39. (in Chinese)
- [40] 李凯, 陆崑, 吴沂宁, 等. eVTOL 航空器适航取证路径研究[J]. *航空维修与工程*, 2022(9):43-45.
Li Kai, Lu Kun, Wu Yining, et al. Research on airworthiness certification path of eVTOL aircraft[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2022(9):43-45. (in Chinese)
- [41] CCAR-21-R4 民用航空器产品和零部件合格审定规定[S]. 中国民用航空局, 2017.
CCAR-21-R4 certification procedures for civil aviation products and parts[S]. Civil Aviation Administration of China, 2017.(in Chinese)
- [42] CCAR-23 正常类、实用类、特技类和通勤类飞机适航规定[S]. 中国民用航空局, 2004.
CCAR-23 Airworthiness regulations for normal, utility, aerobatic and commuter aircraft[S]. Civil Aviation Administration of China, 2004.(in Chinese)
- [43] 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 standards for transport aircraft [S]. Civil Aviation Administration of China, 2011.(in Chinese)
- [44] CCAR-27-R2 正常类旋翼航空器适航规定[S]. 中国民用航空局, 1988.
CCAR-27-R2 Airworthiness regulations for normal class rotorcraft [S]. Civil Aviation Administration of China, 1988.(in Chinese)
- [45] CCAR-29 运输类旋翼航空器适航规定[S]. 中国民用航空局, 2017.
CCAR-29 Airworthiness regulations for transport rotorcraft [S]. Civil Aviation Administration of China, 2017.(in Chinese)
- [46] CCAR-31 载人自由气球适航规定[S]. 中国民用航空局, 2007.
CCAR-31 Airworthiness regulations for manned free balloons [S]. Civil Aviation Administration of China, 2007.(in Chinese)
- [47] EASA. Special condition for small-category VTOL aircraft[Z]. EASA: 2019.
- [48] 姜延坤, 刘薇薇. EASA 小型垂直起降航空器专用条件及符合性方法研究[J]. *航空维修与工程*, 2021(3):101-104.
Jiang Yankun, Liu Weiwei. Research on special condition and means of compliance for small category VTOL aircraft under EASA[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2021(3): 101-104. (in Chinese)
- [49] 王运盛, 祁辛天, 汪鹏辉. eVTOL 飞机级安全性减缓措施和效果分析[J]. *民用飞机设计与研究*, 2024 (1):114-120.
Wang Yunsheng, Qi Xintian, Wang Penghui. eVTOL aircraft level safety mitigation measures and efficacy analysis[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2024(1): 114-120. (in Chinese)
- [50] 杨晓琳, 张乐, 陈红英. 国内外 eVTOL 发展现状及应用场景 [J]. *中国科技信息*, 2024(22):59-61.
Yang Xiaolin, Zhang Le, Chen Hongying. The development status and application scenarios of eVTOL at home and abroad [J]. *China Science and Technology Information*, 2024 (22): 59-61. (in Chinese)
- [51] Littell J D. Challenges in vehicle safety and occupant protection for autonomous electric vertical take-off and landing (eVTOL) vehicles[C]. 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2019.

- [52] 魏榕祥. 飞机抗坠毁设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- Wei Rongxiang. The crash resistance research on aircraft structure design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [53] 邱少波. 汽车碰撞安全工程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- Qiu Shaobo. Vehicle crash safety engineering[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [54] Yvette A R. Transport aircraft crashworthiness and ditching working group report to FAA[Z]. Approved Direction of ARAC, 2018.
- [55] Jacob P, Littell J. Evaluation of impact energy attenuators and composite material designs of a UAM VTOL concept vehicle [C]. VFS 75th Annual Forum and Technology Display, 2019.
- [56] Feraboli P, Wade B, Francesco D, et al. Crush energy absorption of composite channel section specimens[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(8): 1248-1256.
- [57] Littell J D, Putnam J B, Hardy R C. The evaluation of composite energy absorbers for use in UAM VTOL vehicle impact attenuation[C]. 75th American Helicopter Society Annual Forum, 2019.
- [58] Matthias W, Paul S, Marius L. Simulation studies on eVTOL crashworthiness in the conceptual and preliminary design phase [C]. 10th Triennial International Aircraft Fire and Cabin Safety Research Conference, 2022.
- [59] Waimer M, Kohlgruber D, Hachenberg D, et al. Experimental study of CFRP components subjected to dynamic crash loads [J]. Composite Structures, 2013, 105: 288-299.
- [60] Delsart D, Portemont G, Waimer M, et al. Crash testing of a CFRP commercial aircraft sub-cargo fuselage section[C]. European Conference on Procedia Structural Integrity, 2016: 2198-2205.
- [61] Delsart D, Joly D, Mahe M, et al. Evaluation of finite element modeling methodologies for the design of crashworthy composite commercial aircraft fuselage[C]. 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2013.
- [62] Meng Fanxing, Zhou Qin, Yang Jialing. Improvement of crashworthiness behaviour for simplified structural models of aircraft fuselage[J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(1): 1-15.
- [63] Karen E J, Edwin L F. Crashworthy model evaluation of a 1/5-scale composite fuselage concept[R]. NASA/TM-1999-209132, 1999.
- [64] Alkhatib F, Mahdi E, Dean A. Development of composite double-hat energy absorber device subjected to traverser loads [J]. Composite Structures, 2020, 240: 112046.
- [65] Jacob P, Littell J, Mercedes R. Development and analysis of energy absorbing subfloor concepts to improve eVTOL crashworthiness[C]. Vertical Flight Society's 78th Annual Forum & Technology Display, 2022.
- [66] Littell J, Jacob P. A summary of test results from a NASA lift + cruise eVTOL crash test[C]. Vertical Flight Society's 79th Annual Forum & Technology Display, 2023.
- [67] Jacob P, Littell J. Crashworthiness of a lift plus cruise eVTOL vehicle design within dynamic loading environments[C]. Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display, 2020.
- [68] Jackson K E, Richard L, Boitnott E L, et al. A summary of DOD-Sponsored research performed at NASA Langley's Impact Dynamics Research Facility[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2006, 51(1): 59.
- [69] Chambers J R. Partners in freedom: Contributions of the Langley Research Center to U.S. military aircraft of the 1990's [R]. NASA SP-2000-4519, 2000.
- [70] Kellas S. Deployable rigid system for crash energy management: US Patents, US-7040658-B2[P]. 2006-05-09.
- [71] Kellas S, Jackson K E, Littell J D. Full-scale crash test of an MD-500 helicopter with deployable energy absorbers[C]. 66th American Helicopter Society Annual Forum, 2010.
- [72] Littell J D. Crash test of an MD-500 helicopter[C]. 67th American Helicopter Society Annual Forum, 2011.
- [73] Putnam J, Littell J, Gardner N, et al. Component characterization of an eVTOL reference model for crashworthiness studies [C]. Vertical Flight Society's 80th Annual Forum & Technology Display, 2024.
- [74] Putnam J B, Littell J D. Simulation and analysis of NASA lift plus cruise eVTOL crash test[C]. Proceedings from the Vertical Flight Society 79th Annual Forum and Technology Display, 2023.

- [75] Littell J. Full scale crash testing at NASA Langley Research Center's landing and impact research facility with application toward electric vertical take off and landing (eVTOL) crashworthiness[C]. ASTM Powerplant Meeting, 2023.
- [76] Putnam J B, Somers J T, Wells J A, et al. Development and evaluation of a finite element model of the THOR for occupant protection of spaceflight crewmembers[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 82: 244-256.
- [77] Kleinberger M, Sun E, Eppinger R, et al. Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint systems[S]. National Highway Traffic Safety Administration, 1998.
- [78] 49 CFR. Occupant crash protection[S]. National Highway Traffic Safety Administration, 2022.
- [79] Rattana-graikanakorn B, Schuurman M J, Gransden D I, et al. Modelling head injury due to unmanned aircraft systems collision: Crash dummy vs human body[J]. International Journal of Crashworthiness, 2022, 27(2): 400-413.
- [80] Scott M W, McConnell W E, Guzman H M, et al. Comparison of human and ATD head kinematics during low-speed rear end impacts[R]. SAE Technical Paper, 1993.
- [81] Mildon P J, White D, Girdlestone C, et al. Initial adaption of the injury risk of the human leg under high rate axial loading for use with a hybrid III[J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2018, 2: 1-9.
- [82] Gaewsky J P, Jones D A, Ye X, et al. Human Surrogate finite element models under multi-directional loading: applications of aerospace data for the future of automotive environments [R]. SAE Technical Paper, 2018.
- [83] Putnam J B, Untaroiu C D. Investigation of human kinematics and risk of injury during a vertical impact using dummy and human finite element models[C]. Ohio State University Injury Biomechanics Symposium, 2013.
- [84] Hostetler Z S, Aira J, Stitzel J D, et al. A computational study of the biomechanical response of the human lower extremity subjected to high rate vertical accelerative loading[C]. IRCOBI Conference, 2019: 662-673.
- [85] Park G, Kim T, Crandall J R, et al. Comparison of kinematics of GHBM to PMHS on the side impact condition[C]. IRCOBI Conference, 2013: 368-379.
- [86] Littell J, Putnam J. Crashworthiness research overview[C]. NASA/FAA eVTOL Crashworthiness Workshop Series: Virtual Meeting, 2021.
- [87] Putnam J. Human body models for crashworthiness research overview[C]. NASA / FAA eVTOL Crashworthiness Workshop Series: Virtual Meeting, 2021.
- [88] 李军, 李虎林. 电动汽车锂离子电池荷电状态估算方法综述 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2147-2158.
- Li Jun, Li Hulin. A review of the state of charge estimation methods for the electric vehicle lithium-ion batteries[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2147-2158. (in Chinese)
- [89] 陈现涛, 李雨泽, 邹晓龙, 等. 不同热处理次数对软包锂离子电池热安全性影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (4):1719-1724.
- Chen Xiantao, Li Yuze, Zou Xiaolong, et al. Effect of different times of heat treatment on thermal safety of soft pack lithium-ion battery[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22 (4): 1719-1724. (in Chinese)
- [90] Juner Z, Tomasz W, Wei L. A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2018, 378: 153-168.
- [91] Leo C V D, Rejovitzky E, Anand L. Diffusion deformation theory for amorphous silicon anodes: The role of plastic deformation on electrochemical performance[J]. International Journal of Solids & Structures, 2015, 67-68: 283-296.
- [92] Wang Xueju, Fan Feifei, Wang Jiangwei, et al. High damage tolerance of electrochemically lithiated silicon[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8417.
- [93] 陈建超. 粘接剂与隔膜力学行为对锂离子电池失效及安全影响机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- Chen Jianchao. Roles of binder and separator mechanical behaviors in the lithium-ion battery ageing and safety[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [94] 郭亚周, 刘小川, 白春玉, 等. 轻小型无人机锂电池在冲击载荷下机械/电化学耦合失效特性试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(31): 14002-14010.
- Guo Yazhou, Liu Xiaochuan, Bai Chunyu, et al. Mechanical/ Electrochemical coupling failure characteristics tests of light and small UAVs lithium battery under impact load[J]. Science

- Technology and Engineering, 2022, 22(31): 14002-14010. (in Chinese)
- [95] 刘新华, 郭斌, 何璐, 等. 轻型无人机电池动态冲击性能研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(2): 177-186.
- Liu Xinhua, Guo Bin, He Rong, et al. Research on dynamic impact performance of light UAV battery[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(2): 177-186. (in Chinese)
- [96] Chen Xiaoping, Wang Tao, Zhang Yu, et al. Dynamic mechanical behavior of prismatic lithium-ion battery upon impact[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43: 7421-7432.
- [97] Jia Yikai, Yin Sha, Liu Binghe, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon dynamic mechanical loading[J]. Energy, 2019, 166: 951-960.
- [98] Yamanaka T, Takagishi Y, Tozuka Y, et al. Modeling lithium-ion battery nail penetration tests and quantitative evaluation of the degree of combustion risk [J]. Journal of Power Sources, 2019, 416: 132-140.
- [99] Yang Sheng, Wang Wenwei, Lin Cheng, et al. Investigation of Internal short circuits of lithium-ion batteries under mechanical abusive conditions[J]. Energies, 2019, 12(10): 1885-1900.
- [100] 康华平, 李政. 锂离子动力电池模组碰撞失效行为试验研究[J]. 上海汽车, 2019(8): 7-12, 42.
- Kang Huaping, Li Zheng. Experimental study on collision failure behavior of lithium-ion power battery module[J]. Shanghai Auto, 2019(8): 7-12, 42. (in Chinese)
- [101] Hu Lingling, Zhang Ziwen, Zhou Mingzhe. Crushing behaviors and failure of packed batteries[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 143: 103618.
- [102] Zhu Feng, Du Xianping, Lei Jianyin. Experimental study on the crushing behaviour of lithium-ion battery modules[J]. International Journal of Crashworthiness, 2021, 26(6): 598-607.
- [103] 胡玲玲, 陈圣儒, 张子文, 等. 填充电池组的耐撞安全性[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(6): 604-611.
- Hu Lingling, Chen Shengru, Zhang Ziwen, et al. Crashworthiness of protected battery pack[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(6): 604-611. (in Chinese)
- [104] Nguyen T N, Siegmund T, Tsutsui W, et al. Bi-objective optimal design of a damage-tolerant multifunctional battery system[J]. Materials & Design, 2016, 105: 51-65.
- [105] 董晴雯, 王丽娟, 陈宗渝, 等. 电池包侧面碰撞仿真响应特性和安全性分析[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(4): 386-391.
- Dong Qingwen, Wang Lijuan, Chen Zongyu, et al. Analysis of response characteristics and safety of battery pack side impact simulation[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2020, 42(4): 386-391. (in Chinese)
- [106] Istiyanto J, Sumarsono D A, Utomo M S, et al. Development of platform structure as protection to lithium batteries in electric vehicle during crash impact[C]. 2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology, 2013: 1-8.
- [107] Kukreja J, Nguyen T, Siegmund T, et al. Crash analysis of a conceptual electric vehicle with a damage tolerant battery pack [J]. Extreme Mechanics Letters, 2016, 9(3): 371-378.
- [108] 李宁宁. 电动汽车电池系统结构设计及动力电池碰撞安全性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- Li Ningning. Research on the battery system structural design of electric vehicle and power battery collision safety[D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [109] Littell J D. The development of a conical composite energy absorber for use in the attenuation of crash/impact loads[C]. ASTM-D30 Committee Meeting, 2014.
- [110] Littell J D. Crash test of three Cessna 172 aircraft at NASA Langley Research Center's landing and impact research facility [R]. NASA/TM 2015-218987, 2015.
- [111] Jackson K E, Boitnott R L, Fasanella E L, et al. A history of full-scale aircraft and rotorcraft crash testing and simulation at NASA Langley Research Center[C]. 4th Triennial International Aircraft and Cabin Safety Research Conference, 2004.
- [112] Littell J, Putnam J, Cooper M. Simulation of lift plus cruise vehicle models to define a Full-Scale crash test campaign[C]. Vertical Flight Society's Virtual 77th Annual Forum, 2021.
- [113] 韩云, 朱鹏飞, 昌敏, 等. 带乘员模型的eVTOL飞行器适坠性数值分析[C]. 第三届无人系统高峰论坛, 2023.
- Han Yun, Zhu Pengfei, Chang Min, et al. Crashworthiness simulation of an eVTOL vehicle with ATD[C]. 3th Summit Forum on Unmanned Systems, 2023. (in Chinese)

Progress and Prospects on the Crashworthiness of eVTOL Vehicles

Liu Xiaochuan^{1,2,3}, Xi Xulong^{1,2,3}, Bai Chunyu^{1,2,3}, Li Xiaocheng^{1,2,3}, Zhang Xinyue^{1,2,3}, Han Hezhao^{1,2,3}

1. *National key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China*

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

3. *Shaanxi Province Key Laboratory of Aircraft Vibration, Impact and Noise, Xi'an 710065, China*

Abstract: As an emerging equipment of the low-altitude economy, eVTOL has broad application prospects and market demand, but its safety has been fully verified and evaluated, especially in terms of crashworthiness and occupant protection in emergency situations. Crashworthiness is a complex nonlinear impact dynamics problem. Airworthiness standards and advisory circulars and other regulatory policies have made explicit provisions for the crashworthiness of aircraft, requiring the safety of passengers to be ensured reasonable design. This specifically involves the crash deformation and structural energy absorption of the fuselage, the complex constraints and protective measures of the occupant seat system, the absorption design and load-bearing of the landing gear system, etc. These designs need to be evaluated through experimental methods or validated analytical methods. This paper analyzes the research in recent years on several key issues in eVTOL crashworthiness research, such as airworthiness clauses and verification methods, structural crashworthiness design, seat system crash tests and analysis, battery system crash tests and analysis, and fuselage structure crash tests and analysis. The main research progress is summarized, and main challenges currently faced by the research are analyzed, with the hope of providing some references for the design and evaluation of eVTOL crashworthiness.

Key Words: eVTOL; crashworthiness; airworthiness requirements; crash test; simulation analysis; building block verification