# 某型民机在不同地面环境下适坠性研究

### 冯子龙<sup>1</sup>,朱书华<sup>1\*</sup>,惠旭龙<sup>2</sup>

(1.南京航空航天大学,南京 211000; 2.中国飞机强度研究所,西安 710000)

摘要:目的研究不同地面环境下的民机适坠性。方法 以某型民机中机身段为研究对象,基于动力学仿真 软件 LS-Dyna 建立含航空座椅与假人的中机身段有限元分析模型,选取刚性、软质、硬质3种典型地面环 境进行民机坠撞有限元仿真分析,从机体结构破坏、地面能量吸收及舱内乘员损伤情况等方面,系统研究 不同坠撞环境民机适坠性。结果 地面环境刚度越高,民机坠撞损伤越严重,地面吸收能量与其变形量呈正 相关。在 6.1 m/s 冲击下,由于货舱破坏与地面变形吸收冲击能量,舱内乘员并未出现超出损伤阈值的危险 情况。其中乘员腰椎损伤程度最高,股骨损伤程度最低。结论 该型民机在 6.1 m/s 初速度下的适坠性较好, 舱内乘员未发生严重损伤。地面刚度越低,对冲击能量的吸收效果越好,民机的适坠性越好。对舱内乘员 而言,靠窗侧假人损伤情况整体低于靠走廊侧假人。

关键词:民用飞机;适坠性;乘员安全;结构失效;地面环境;飞行器设计 中图分类号:V223+.2 文献标志码:A 文章编号:1672-9242(2025)02-0020-11 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.003

#### **Crash Worthiness of a Civil Aircraft in Different Ground Environments**

FENG Zilong<sup>1</sup>, ZHU Shuhua<sup>1\*</sup>, HUI Xulong<sup>2</sup>

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211000, China;
 Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the crashworthiness of civil aircraft in different ground environments. With the mid body section of a certain type of civil aircraft as the research object, a finite element analysis model of the mid body section containing aviation seats and dummies was established based on the dynamic simulation software LS-Dyna. Three typical ground environments, rigid, soft, and hard, were selected for a finite element simulation analysis of civil aircraft crashes. From the aspects of body structure damage, ground energy absorption, and cabin passenger damage, the worthiness of civil aircraft to different crash environments was systematically studied. The results indicated that the higher the stiffness of the ground environment, the more severe the impact damage of civil aircraft, and the energy absorbed by the ground was positively correlated with its deformation. Under a 6.1 m/s impact, due to the damage to the cargo hold and the absorption of impact energy by ground deformation, there was no danger of exceeding the damage threshold for the occupants inside the cabin. Among them, the passenger had the highest degree of lumbar injury and the lowest degree of femoral injury. This type of civil aircraft has good crash resistance at an initial

收稿日期: 2024-10-26; 修订日期: 2024-11-21

Received: 2024-10-26; Revised: 2024-11-21

基金项目: 航空科学基金(20230009052004)

**Fund:** Aeronautical Science Foundation of China (20230009052004)

引文格式: 冯子龙,朱书华,惠旭龙.某型民机在不同地面环境下适坠性研究[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 20-30.

FENG Zilong, ZHU Shuhua, HUI Xulong. Crash Worthiness of a Civil Aircraft in Different Ground Environments[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 20-30.

<sup>\*</sup>通信作者(Corresponding author)

speed of 6.1 m/s, and there are no serious injuries to the passengers inside the cabin. The lower the ground stiffness, the better the absorption effect of impact energy, and the better the crashworthiness of civil aircraft. For passengers in the cabin, the overall damage to the window side dummy is lower than that of the corridor side dummy.

KEY WORDS: civil aircraft; crashworthiness;passenger safety; structural failure; ground environment; aircraft design

安全是民航领域的重要研究课题。为保证舱内乘 员在可生存事故中的存活率,民用飞机必须具有一定 程度的抗坠撞能力。在非跑道坠撞事故中,民机发生 坠撞事故时的着陆地面包括软质与硬质 2 种不同地 面材质,而这 2 种不同材质对于民机内乘员在坠撞事 故中的损伤情况影响也有所不同。因此,有必要研究 不同地面环境对于民机适坠性的影响。

对于坠撞环境下民机的适坠性,国内外学者进行 过相关实验与仿真研究。刘小川等[1]进行了全机坠撞 实验。王星雨等<sup>[2]</sup>以某型民机中机身段为研究对象, 研究了客舱下部机身框适坠性问题。王伟俊等[3]对大 型飞机货舱承力部件进行了坠撞环境下吸能特性研 究。白春玉等<sup>[4]</sup>对坠撞环境下的民机初始速度选取问 题进行了相关研究。古阳<sup>[5]</sup>等基于积木式坠撞实验规 划,对复合材料机身段进行了适坠性研究。民机安全 性最终需落实到舱内乘员的身上,因此,对于舱内乘 员在坠撞过程中的损伤情况,进行了实验与仿真分 析。彭亮等<sup>[6]</sup>基于舱内乘员的安全性对复合材料机身 段坠撞响应进行了研究。牟浩蕾等[7]对坠撞环境下的 乘员损伤情况进行了相关研究。王玖等<sup>[8]</sup>基于统计的 坠撞事故对坠撞环境下乘员的损伤程度评估方法进 行了研究。王丽珍等<sup>[9]</sup>对军机飞行员的颈部损伤情况 进行了相关研究。冯文树等[10]对人体着陆姿态对于人 体着地时的冲击响应进行了研究。着陆环境的不同对 于民机坠撞结果有很大影响。对于不同的地面环境, Naghipour 等<sup>[10]</sup>对土壤环境进行数值建模,研究了飞 行器在软土地上的碰撞性能。Evans 等<sup>[11]</sup>基于欧拉的 有限元技术进行了土壤冲击分析。Abedini 等<sup>[12]</sup>对 LS-Dyna 中混凝土等材料参数进行了相关研究。在现 有的研究中,相对较多地关注飞机在坠撞过程中的结 构破坏情况,奠定了适坠性研究的主基调。研究基本 可以明确,机体结构在坠撞环境下的破坏能够吸收冲 击能量,以降低舱内乘员过载。然而,对于民机适坠 性的研究中,关注不同地面环境影响的研究并不多, 且对于坠撞环境的安全性更多地从乘员质点过载与 结构破坏的角度研究,对于舱内成员各部位的具体损 伤情况研究较少。飞机的适坠性最终要落实到实际环 境情况中,要落实到具体乘员的安全问题上,因此有 必要对此展开更深入的研究。

本文建立了更贴近实际坠撞事故的研究模型,参 考土壤与水泥相关参数,建立软质与硬质地面环境模 型,对比刚性地面环境。从舱内不同位置乘员身体不 同部位损伤程度的角度出发,研究不同特性的地面环 境对于坠撞事故中乘员安全性的影响,着重研究不同 地面环境的能量吸收效果与坠撞事故中舱内乘员的 具体损伤情况。

#### 1 坠撞有限元模型建模策略

对于民机适坠性的研究,相比于具体实验,有限 元仿真以其低成本、高效率受到广泛应用。对于有限 元仿真来说,模型的科学性、准确性是仿真结果正确 性的重要保障。合理、精确的有限元模型对于有限元 仿真来说至关重要。

#### 1.1 某型民机中机身段有限元模型

取用某型民机中机身段7框6段模型进行坠撞仿 真分析。机身结构可大致分为蒙皮、机身隔框、梁、 桁条、客舱地板、货舱地板、底部承力支柱、行李架 等部分,框段之间的距离为440 mm。由于民机中大 部分部件为钣金件,即厚度较薄的结构,机身段主体 基于各部件中面采用壳单元进行有限元建模。货舱承 力支柱、地板梁、客舱导轨等承力部件的螺栓连接采 用可变性梁单元进行模拟,焊接部位采用共节点方式 进行连接。对于部分绞片等非主承力部件的不可破坏 连接,为简化计算,采用刚性连接<sup>[15-21]</sup>。民机中机身 段网格尺寸约为 20 mm,总网格量为462 395,总节 点数为499 017。机身段总质量为409.775 kg。

座椅部分采用二联航空座椅。航空座椅可大致分为座椅框架结构、坐垫、靠垫、扶手及小桌板。对机身段模型及航空座椅模型进行简化,去除圆角等工艺结构,将小孔部分简化为等效点。同时,采用杆单元、梁单元等方式模拟螺栓连接、铆接、焊接等连接工艺。航空座椅主体结构同样多采用钣金件,因此以模型各部件中面为基准,建立壳单元有限元模型。同时,座椅、靠垫部位由于会出现较大变形,需要建立六面体网格模型<sup>[24-25]</sup>。总网格量为 36 288,总节点数 45 225。航空座椅总质量 22.3 kg。

乘员模型采用 Hydrid III 型 50%假人模型,名义 质量为 77 kg。将 2 个假人模型置于二联航空座椅上, 并按照民用飞机中乘员安全带的样式,在乘员腰部 建立两点式航空安全带。机身框段空间包含 3 排乘 员,左右两侧均为二联航空座椅。将假人及航空座 椅模型置于第二排左侧,座椅腿部与客舱内地面导 轨对齐,并将其与导轨连接。为简化计算,将客舱 内其他乘员及座椅的位置以等效质量点替代。包含 航空座椅与假人的某型民机中机身段有限元模型如 图 1 所示。



图 1 中机身段完整有限元模型 Fig.1 Complete finite element model of mid body section

适坠性分析初始坠撞速度为 6.1 m/s<sup>[4]</sup>。每个二联 航空座椅及座椅上 2 个假人的总质量为 179.285 kg, 含航空座椅、假人的机身段模型总质量为 1494.12 kg。

#### 1.2 地面环境有限元模型

坠撞事故的地面环境可以分为软质地面与硬质 地面 2 种情况。不同于刚性地面,在考虑地面具体材 质时,地面模型不能简单使用一层壳单元。由于地 面也会在坠撞过程中产生变形,整个地面模型需使 用六面体单元,以更准确地研究地面变形吸收能量 的过程。

对于软质地面,在 LS-Dyna 中使用 Mat5\_soil\_ and\_foam 关键字设置材料。该关键字多用于土壤等 材料的设置。参考坠撞事故统计中土壤的硬度与土壤 的孔隙和含水量等属性,软质地面详细材料参数设置 见表 1。同时, Mat5 材料需要手动拟合压力应力曲 线和设置体积应变和压力的关系,压力应力曲线公式 如式(1)所示。

$$\sigma_{\rm y} = \left[ 3 \left( a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中: *a*<sub>0</sub>、*a*<sub>1</sub>、*a*<sub>2</sub>为塑性屈服函数的屈服函数常数; *p*为压力。

表 1 软质地面材料 Tab.1 Soft ground material

密度/(kg·mm <sup>-3</sup> )	剪切模量/GPa	体积模量/GPa	a <sub>0</sub> /GPa	$a_1/\text{GPa}$	a <sub>2</sub> /GPa	PC/GPa
$1.29 \times 10^{-6}$	31.7	0.168	$6.18 \times 10^{-12}$	$5.14 \times 10^{-6}$	1.068	0

硬质地面在 LS-Dyna 中使用 Mat159\_cscm\_ concrete 关键字进行材料参数设置。该关键字多用于 混凝土等材料的参数设置。其中, IRATE 为应变速率 控制参数, ERODE 为侵蚀失效参数, *F*c 为抗压强度, DAGG 为合直径。硬质地面详细材料参数见表 2。

	表 2	硬质地面	材料	
	Tab.2 Ha	rd ground r	naterial	
密度/ (kg·mm <sup>-3</sup> )	IRATE	ERODE	F <sub>c</sub> /GPa	DAGG/mm
$2.32 \times 10^{-6}$	1	1	0.04	25.4

为避免仿真过程中地面出现垂向位移,对地面模型底部采用 boundary\_spc 关键字进行垂向约束。同时,由于在实际环境下,地面并不仅仅是民机着陆处附近的一小块地方,而是近似横向无限大,垂向无限高的环境,因此需对整个地面模型的四周及底部进行无反射边界条件设定,在LS-Dyna中使用 boundary\_non\_reflection 关键字进行设置。包含民机中机身段、航空座椅、假人、地面环境的完整坠撞有限元模型如图 2 所示。

## 2 不同地面环境下坠撞有限元仿真 分析

民机的正常着陆速度约1 m/s, 起落架系统的设



图 2 完整有限元模型 Fig.2 Complete finite element model

计极限着陆速度为 3.05 m/s。坠撞情况是着陆速度远远大于起落架的承受极限,着陆时不使用起落架着地,而是改为使用飞机腹部着地的情况。参考统计的坠撞事故统计及国内外进行过的相关坠撞试验,可生存坠撞事故的平均初始坠撞速度约为 6.1 m/s,因此本文以此速度进行仿真分析,研究刚性地面、硬质地面及软质地面环境下机身坠撞响应及舱内乘员损伤情况。

#### 2.1 刚性地面环境坠撞分析

典型民机在刚性地面环境下的坠撞时间历程如 图 3 所述。碰撞发生时,机身框架底部中心先接触地



图 3 刚性地面坠撞过程 Fig.3 Crash process of rigid ground

面,冲击力过大导致机身隔框底部断裂破坏,并向上 凸起。随着坠撞过程的进行,隔框底部变形凸起的部 分越来越多,机身与地面接触点向两侧移动。机身隔 框在承力支柱下方变形破坏并出现塑性铰,逐渐吸收 所有冲击能量,结构破坏变形达到最大值。 取左右两座椅椅面坐垫下部的承力平面,测量其 速度与加速度变化。左右两座椅速度与加速度如图 4 所示。两座椅速度与加速度变化趋势一致,靠窗侧座 椅速度低于靠走廊侧座椅,加速度变化不大,且靠走 廊侧座椅加速度峰值低于靠窗侧座椅。



图 4 刚性地面坠撞过程中两座椅速度与加速度 Fig.4 Speed and acceleration of aviation seats of crash process of rigid ground: a) speed; b) acceleration

依据适航规章<sup>[11]</sup>中应急着陆部分的要求,对假人 头部 HIC、腰椎与骨盆间压缩载荷 S<sub>el</sub>、股骨压缩载 荷 F<sub>fc</sub>进行测量,分析该情况下舱内成员损伤情况, 结果见表 3。两假人头部 HIC 均低于 200,远小于适 航规章中给定的头部损伤阈值 1 000。腰椎与骨盆间 压缩载荷分别为 2 641.46、4 246.53 N,均小于适航 规章中规定的阈值 6 672 N。两假人两股骨所受最大 压缩载均低于 600 N,小于适航规章中规定的阈值 10 008 N。两假人各部位损伤情况均未达到适航规章 中规定的损伤阈值,靠窗侧与靠走廊侧假人损伤情况 相差不大。其中,靠走廊侧假人腰椎与骨盆间压缩载 荷相对偏大,占适航规章规定损伤阈值的 63.65%。

表 3 刚性地面 坐撞过程 中乘员损伤情况				
Tab.3 Passenger injury situation of crash process of rigid ground				
损伤值	头部 HIC	腰椎与骨盆间压缩载荷 S <sub>cl</sub> /N	左股骨压缩载荷 F <sub>fc</sub> /N	右股骨压缩载荷 $F_{\rm fc}/N$
靠窗侧假人	173.1	2641.46	387.84	581.14
靠走廊侧假人	178.5	4246.53	479.78	497.57
适航规章要求	1 000	6 672	10 008	10 008

在这种情况下,舱内乘员均不会产生严重损伤。

#### 2.2 软质地面环境坠撞分析

软质地面环境下的机身段坠撞过程如图 5 所示。 软质地面环境有限元模型中对地面赋予了材料属性, 坠撞仿真中地面应力分布如图 6 所示。在坠撞环境仿 真中,由于地面可变性,在机身段与地面碰撞的过程 中,地面被压缩,吸收部分冲击能量,在初始冲击能 量不变的情况下,由机身段所承受的冲击能量较低。 因此,对比刚性地面的情况,软质地面环境下货舱变 形更小。相比于刚性地面环境,客舱垂向位移更低, 货舱下部同样发生破坏,但破坏程度较轻,且底部未 触及客舱地板。

在软质地面坠撞情况下, 左右两座椅速度与加 速度如图 7 所示。两座椅速度与加速度变化趋势一 致。加速度在 25~50 ms 最大,之后逐渐降低。靠窗 侧座椅速度整体低于靠走廊侧座椅,加速度峰值也 较低。

在该工况下,乘员头部、腰椎与股骨损伤情况见 表 4。两假人头部 HIC 均低于 200, 远小于适航规 章中给定的头部损伤阈值1000。腰椎与骨盆间压缩 载荷分别为 2 220.552、3 643.19 N,均小于适航规章 中规定的阈值 6 672 N。两假人两股骨所受最大压缩 载均低于 600 N, 小于适航规章中规定的阈值 10 008 N。两假人各部位损伤情况均未超过损伤阈 值。在此工况下,舱内乘员均不会受到严重损伤。对 比刚性地面环境,乘员各项损伤情况均偏低。表明在 质地较软的地面下机身段适坠性较好。

#### 2.3 硬质地面环境坠撞过程分析

硬质地面环境下坠撞过程如图 8 所示。在该情况 下,客舱地板下部破坏凸起情况与刚性地面情况相 当。硬质地面属性介于刚性地面与软质地面之间。由 于硬质地面变形程度远低于软质地面,其吸能特性也 较差。相比于刚性地面,硬质地面又有吸收能量的能 力。硬质地面应力分布如图9所示。



c 90 ms

图 5 软质地面坠撞过程 Fig.5 Crash process of soft ground



图 6 软质地面 von-Mises 应力 Fig.6 von-Mises stress on soft ground



图 7 软质地面坠撞过程中座椅速度与加速度

Fig.7 Speed and acceleration of aviation seats of crash process of soft ground: a) speed; b) acceleration

表 4 软质地面坠撞过程中乘员损伤情况				
Tab.4 Passenger injury situation of crash process of soft ground				
损伤值	头部 HIC	腰椎与骨盆间压缩载荷 S <sub>cl</sub> /N	左股骨压缩载荷 $F_{\rm fc}/N$	右股骨压缩载荷 $F_{\rm fc}/N$
靠窗侧假人测量值	179.6	2 220.552	443.56	513.136
靠走廊侧假人测量值	181.8	3 643.19	457.338	380.747
适航规章要求	1 000	6 672	10 008	10 008

硬质地面环境坠撞过程中,左右两座椅速度与加 速度如图 10 所示。两座椅速度与加速度变化趋势一 致,靠窗侧座椅速度低于靠走廊侧座椅,加速度变化 不大,且靠走廊侧座椅加速度峰值低于靠窗侧座椅。 在该工况下,乘员损伤情况见表 5。两假人头部 HIC 均低于 200,远小于适航规章中给定的头部损伤 阈值 1 000。腰椎与骨盆间压缩载荷分别为 2 721.52、 4 467.77 N,均小于适航规章中规定的阈值 6 672 N。



图 8 硬质地面坠撞过程 Fig.8 Crash process of hard ground



c 90 ms

d 120 ms

图 9 硬质地面 von-Mises 应力 Fig.9 von-Mises stress on hard ground



图 10 硬质地面坠撞过程中两座椅速度与加速度 Fig.10 Speed and acceleration of aviation seats of Crash process of hard ground: a) speed; b) acceleration

表 5 硬质地面坠撞过程中乘员损伤情况 Tab.5 Passenger injury situation of crash process of hard ground

损伤值	头部 HIC	腰椎与骨盆间压缩载荷 S <sub>cl</sub> /N	左股骨压缩载荷 F <sub>fc</sub> /N	右股骨压缩载荷 F <sub>fc</sub> /N
靠窗侧假人测量值	179.6	2 721.52	520.44	616.85
靠走廊侧假人测量值	185.9	4 467.77	512.02	428.60
适航规章要求	1 000	6 672	10 008	10 008

两假人两股骨所受最大压缩载均低于 650 N,小于适 航规章中规定的阈值 10 008 N。两假人各部位损伤情 况均未超过损伤阈值。在此工况下,舱内乘员均不会 受到严重损伤。相较于刚性地面环境,硬质地面环境 下乘员各部位损伤情况与刚性地面环境相比,各项相 差均较小。但与软质地面相比,乘员各项损伤均有所 增大。说明硬质地面环境与刚性地面环境对于机身段 坠撞损伤情况影响相当,地面环境质地越柔软,舱内 乘员损伤程度越轻。

### 3 不同环境下民机适坠性对比分析

对比刚性地面、硬质地面、软质地面 3 种不同情况可知,在初始坠撞速度相同的情况下,刚性地面工况机身变形最严重,软质地面变形最大,吸收能量最多。硬质与软质地面垂向位移如图 11 所示。软质地面位移持续增大,且最大值为 8.913 mm。软质地面在 37 ms时最大位移开始缓慢下降,且下降速度较慢。对比研究坠撞工况可知,此时机身隔框底部断裂,隔框的破坏消耗了一部分冲击能量,使得后续机身段的下沉对于地面的压缩效果降低,地面开始出现小幅度缓慢回弹。在 85 ms 时,机身隔框底部完全断裂翘起,机身与地面接触部位变为底部左右两侧接近承力支柱的部分。由于接触面积减小,接触部分应力增大,地面被快速压缩。硬质地面最大位移为 0.078 mm,相比于软质地面,硬质地面刚度较大,产生的位移较小,所吸收的能量也较低。

地面吸收的动能将转化为地面自身的内能,因此



图 11 地面垂向位移 Fig.11 Vertical displacement of ground

地面内能大小可以反映其吸收冲击能量的大小。软 质地面与硬质地面的时间-内能曲线如图 12 所示。 刚性地面、硬质地面与软质地面的吸能比例见表 6。 可见软质地面由于变形较大,吸收坠撞环境的冲击 能量较多,因此其机身段破坏情况与舱内乘员损伤 情况也较低。硬质地面变形较低,其吸收的总能量 也较低,可见地面对冲击能量的吸收量与其变形程 度呈正相关。

不同地面环境下客舱地板垂向位移如图 13 所 示。各种地面环境下,客舱地板垂向位移随时间变化 的趋势一致,刚性地面与硬质地面环境下客舱地板垂 向位移相当。软质地面下客舱地板垂向位移整体更小 且位移变化速度最低。分析可知,由于软质地面可变



图 12 时间-内能曲线 Fig.12 Time-Internal Energy curve

表 6 不同地面环境吸能比例 Tab.6 Energy absorption ratio in different ground

environments				
环境	内能/J	吸能比例/%		
刚性地面	0	0		
硬质地面	3.505	0.127		
软质地面	8 906.800	27.441		



图 13 不同地面环境下客舱地板垂向位移 Fig.13 Vertical displacement of cabin floor under different ground environments

形程度大,机身段与软质地面接触后,地面开始压缩, 同时货舱开始破坏。在二者共同作用下,整个机身段 变形较缓慢且稳定的过程被延长。同时,由于地面压 缩与货舱下部结构破坏,使得软质地面环境下机身段 总垂向位移相较于硬质地面更大。

对比不同地面环境下乘员各部位损伤情况,如图 14 所示。由于假人头部测量值为 HIC,即和加速度, 而腰椎与骨盆压缩情况与股骨压缩情况均为具体载 荷。各部位测量指标不同,阈值也不同,无法直接比 较损伤程度,因此将假人每一部位损伤情况测量值与 适航规章中规定的损伤阈值相除,所得结果表示乘员 该部位损伤程度占损伤阈值的百分比,该数值越大, 代表乘员对应部位受损伤越严重<sup>[6,18-24]</sup>。当某一项超



图 14 乘员损伤情况 Fig.14 Passenger injury situation

过100%时,表明乘员该部位受到严重损伤。

从图 14 中可知,各种工况下两乘员身体各部位 损伤程度均未达到 100%,表明乘员各部位损伤情况 均未达到阈值,乘员尚未处于严重危险中。其中,乘 员腰椎部位损伤情况相对较严重,腰椎与骨盆间压缩 载荷较大,靠窗侧假人载荷占损伤阈值的 40%左右, 靠走廊侧假人载荷占损伤阈值的 50%以上。乘员股骨 部位损伤程度较低,载荷均低于损伤阈值的 10%。就 整体而言,靠窗侧假人受伤情况整体低于靠走廊侧假 人。对比不同地面环境下乘员损伤情况,地面环境越 柔软,乘员损伤程度越低,民机抗坠撞能力越强。

#### 4 结论

本文基于非线性动力学分析软件 LS-Dyna,对不同地面环境下民机坠撞进行仿真研究,从机身结构、 地面吸能与舱内乘员安全的角度出发,分析了该民机 结构在不同地面环境下的适坠性。所得结论如下:

1)软质地面环境在民机坠撞时能够产生较大压 缩变形,吸收冲击能量,有效降低舱内乘员损伤程度。

2)硬质地面环境在民机坠撞时变形较小,吸收 能量较低,且无明显压缩变形。相比于刚性地面环境, 对于坠撞环境下的安全性影响相差不大。

3)对比不同地面变形情况与其吸收的能量可知, 地面吸收能量与其变形量呈正相关,即地面产生的变 形是地面吸收冲击能量的主要原因。

4)地面刚度越低,越容易被压缩,机身段冲击 后的破坏变形情况越低。

5) 坠撞过程中,两假人均未与客舱设施发生碰 撞,客舱未出现行李架坠落、客舱地板破裂等潜在危 险情况,乘员生存空间完整性较好。

6)在坠撞环境下,该型民机机身段内假人损伤 情况均未超过适航规章中规定的损伤阈值。其中乘员 腰椎损伤程度最高,股骨损伤程度最低。靠窗侧假人 损伤情况整体低于靠走廊侧假人。

#### 参考文献:

- 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): 529664.
   LIU X C, XI X L, ZHANG X Y, et al. Full-Scale Crash Experimental Study of Typical Civil Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 529664.
- [2] 王星雨,朱书华,惠旭龙,等. 某型民用飞机机身结构 适坠性研究[J]. 航空计算技术, 2022, 52(6): 64-67.
   WANG X Y, ZHU S H, XI X L, et al. Research on Crashworthiness of Fuselage Structure of a Civil Aircraft[J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(6): 64-67.
- [3] 王伟俊, 牟浩蕾, 孙滨, 等. 大型飞机货舱地板下部结构吸能特性研究[J]. 力学与实践, 2024, 46(2): 280-289.
  WANG W J, MOU H L, SUN B, et al. Study on Energy Absorption Characteristics of the Subcargo Fuselage Section of Large Aircrafts[J]. Mechanics in Engineering, 2024, 46(2): 280-289.
- [4] 白春玉, 刘小川, 惠旭龙, 等. 民机适坠性研究中的垂向坠撞速度问题探讨[J]. 航空科学技术, 2020, 31(9):
   11-17.

BAI C Y, LIU X C, HUI X L, et al. Discussion on the Problem of Vertical Crash Velocity in the Study of the Crashworthiness of Civil Aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(9): 11-17.

- [5] 古阳. 复合材料民用客机机身段适坠性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
   GU Y. Study on Crashworthiness of Composite Civil Airliner Fuselage Section[D]. Wuhan: Wuhan University of
- Technology, 2019.
  [6] 彭亮.基于乘员生存性的机身结构适坠性设计与评价 方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018.
  PENG L. Research on Design and Evaluation Method of Fuselage Structure Crashworthiness Based on Occupant Survivability[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [7] 牟浩蕾,谢威威,解江,等. 坠撞环境下乘员伤害分析 及飞机适坠性评估[J]. 航空学报, 2024, 45(3): 228786. MOU H L, XIE W W, XIE J, et al. Occupant Injury Analysis and Aircraft Crashworthiness Evaluation under Crash Scenarios[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(3): 228786.
- [8] 王玖,林荣,陈晓峰,等.飞机应急着陆人体损伤评价 方法研究[J].太原理工大学学报,2022,53(2):338-344. WANG J, LIN R, CHEN X F, et al. Study on Evaluation Method of Body Injury in Emergency Landing of Aircraft[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(2):338-344.

[9] 王丽珍, 刘景龙, 赵彦鹏, 等. 飞行过程中头盔对飞行员颈部损伤的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1818-1826.
WANG L Z, LIU J L, ZHAO Y P, et al. Effect of Helmet on Neck Injury of Pilots in Flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9):

1818-1826.

[10] 冯文树,刘铁汉,何扬举,等.不同姿势着陆时人体质 心部位冲击过载的比较[J].第四军医大学学报, 1989(2):87-90.

FENG W S, LIU T H, HE Y J, et al. A Comparison Study on the Loads Imposed on the Total Body Center of Mass with Two Different Landing Postures[J]. Journal of the Fourth Military Medical University, 1989(2): 87-90.

- [11] NAGHIPOUR P, AKTAY L, JOHNSON A F. Numerical Investigation of Structural Crash Response of Thin-Walled Structures on Soft Soil[J]. Materials & Design, 2008, 29(10): 2052-2060.
- [12] EVANS W, JONSON D, WALKER M. An Eulerian Approach to Soil Impact Analysis for Crashworthiness Applications[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 91: 14-24.
- [13] ABEDINI M, ZHANG C W. Performance Assessment of Concrete and Steel Material Models in LS-DYNA for Enhanced Numerical Simulation, a State of the Art Review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2021, 28(4): 2921-2942.
- [14] 中国民用航空总局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25 R4[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2016.
   Civil Aviation Administration of China. Airworthiness Standard for Transport Aircraft: CCAR-25 R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016.
- [15] SONG Y K, HORTON B, PERINO S, et al. A Contribution to Full-Scale High Fidelity Aircraft Progressive Dynamic Damage Modelling for Certification by Analysis[J]. International Journal of Crashworthiness, 2019, 24(3): 243-256.
- [16] BISAGNI C, PIGAZZINI M S. Modelling Strategies for Numerical Simulation of Aircraft Ditching[J]. International Journal of Crashworthiness, 2018, 23(4): 377-394.
- [17] 牟让科, 刘小川. 民机机身结构和内部设施适坠性设 计评估与验证指南[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2016.
  MOU R K, LIU X C. Guide for Design Evaluation and Verification of Civil Aircraft Fuselage Structure and Internal Facilities[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2016.
- [18] 王跃全,朱书华,王涛,等.大型民机机身结构适坠性 仿真分析[J].南京航空航天大学学报,2013,45(2): 186-190.
  WANG Y Q, ZHU S H, WANG T, et al. Simulation on Crashworthiness of Transport Civil Aircraft Fuselage Structures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(2): 186-190.
- [19] 冯振宇, 解江, 李恒晖, 等. 大飞机货舱地板下部结构 有限元建模与适坠性分析[J]. 航空学报, 2019, 40(2): 522394.
   FENG Z Y, XIE J, LI H H, et al. Finite Element Modeling

and Crashworthiness Analysis of Large Aeroplane Sub-Cargo Structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica

Sinica, 2019, 40(2): 522394.

- [20] ANAND S, ALDERLIESTEN R, CASTRO S G P. Crashworthiness in Preliminary Design: Mean Crushing Force Prediction for Closed-Section Thin-Walled Metallic Structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 188: 104946.
- [21] ZHANG Y J, WANG H C. Crashworthiness Analysis of PRSEUS-Based Blended-Wing-Body Civil Aircraft[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 146: 108927.
- [22] 李初晔, 王增新. 结构动力学方程的显式与隐式数值 计算[J]. 航空计算技术, 2010, 40(1): 58-62.
  LI C Y, WANG Z X. Structural Dynamics Equations of the Explicit and Implicit Algorithm[J]. Aeronautical Computing Technique, 2010, 40(1): 58-62.
- [23] 余志刚. 中国 50 百分位人体与标准试验假人正面碰撞 响应差异的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.

YU Z G. Study on the Difference of Frontal Crash Response between China 50 Percentile Human Body and Standard Test Dummy[D]. Changsha: Hunan University, 2008.

- [24] 邹建胜. 民机坠撞环境下乘员座椅/约束系统仿真分析 及优化[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012. ZOU J S. Simulation Analysis and Optimization of Passenger Seat/Restraint System in Civil Aircraft Crash Environment[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [25] 苟仲秋,孙侠生,宋笔锋. 农林飞机简化框体模型坠撞 仿真及优化[J]. 机械强度,2008,30(3):396-399. GOU Z Q, SUN X S, SONG B F. Research on Crashworthiness Simulation and Optimization of an Agriculture and Forestry Aircraft Fuselage Frame[J]. Journal of Mechanical Strength, 2008, 30(3): 396-399.