

基于坠撞安全的复合材料吸能结构研究现状及展望

雷翼飞¹ 巩雨旺² 许阳³ 尹志财¹ 李兴³

1.中国民航大学电子信息与自动化学院 天津 300300

2.中航大(天津)模拟机工程技术有限公司 天津 300384

3.中国民航大学航空工程学院 天津 300300

摘要:对于民航飞机来说,最基本和最重要的要求就是安全性,最常见的飞机坠撞事故对乘员的生命安全构成巨大的威胁。各航空大国对民用飞机的适坠性研究高度重视,我国也在适航标准上对民用飞机的适坠性有明确要求。本文基于民机坠撞安全考虑,综合论述了民机坠撞安全的历史背景,总结了复合材料在机身结构上的应用,以及复合材料吸能结构对于民机坠撞安全性能的提升。

关键词:坠撞安全;吸能结构;复合材料

Research status and prospect of energy absorption structures of composite materials based on crash safety

Yifei Lei¹, Yuwang Gong², Yang Xu², Zhicai Yin¹, Xing Li²

1.College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300

2.CAUC Simulator engineering technology Co.,Ltd, Tianjin 300384

3.College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300

Abstract: For civil aviation aircraft, the most basic and important requirement is safety. The most common aircraft crash accidents pose a huge threat to the passengers' lives. Aviation powers around the world attach great importance to the research on crashworthiness of civil aircraft, and China also has clear requirements on the crashworthiness of civil aircraft in airworthiness standards. This paper is based on the consideration of aircraft crash safety and comprehensively discusses the historical background of aircraft crash safety, summarizes the application of composite materials in fuselage structures, and the improvement of crash safety performance of civil aircraft through the use of composite material energy-absorbing structures.

Keywords: Crash safety, energy absorbing structure, composite materials

一、民机抗坠撞设计背景

自飞机诞生以来,飞机给人类带来了巨大的交通的便利和经济效益,伴随着成千上万次的飞行而来的还有飞行事故,随着科学技术的发展,飞机及其相关部件制造工艺、空中交通管制系统的能力、对飞机的检修能力得到增强。还有相关法规的实行和适航部门的监管能力的不断提高,民用航空器的安全性有了很大保障。即使这样,因为人们还不能对所有的因素有精确的把控,飞机的坠撞事故还是很难完全避免。民航运营过程中,将被迫降落事故中含有飞机结构变形、破坏等参与着陆能量吸收的称为坠撞事故。根据事故中飞机受损情况和不同的人员伤亡科学地将坠撞事故大体上分为三类:轻度坠损、严重但可生存事故和严重不可生存事故三类^[1]。我国也在适航标准上对民用飞机的适坠性有明确要求^[2]。

在上世纪六七十年代,美国军方已经着手于对当时飞机的坠毁后如何尽可能保留乘员进行研究,希望藉此达到为未来飞机提高乘员安全性起到指导性作用^[3]。美国军方对飞机坠撞事故进行调查后发现,使用飞机若能在飞机最初的设计

阶段就考虑到坠撞安全性,根据美军方的样本数据显示这样做能将 92.8% 的事故变为有乘员生存的坠撞事故,这样可以尽最大可能减少坠撞事故对乘员的影响,由于民用飞机结构的耐撞性设计的改良,机上乘员的生存潜力也得到提高。从上世纪 70 年代开始,美国国家航空航天局(NASA)LRC 研究中心联合美国联邦航空局(FAA)主持了一项研究,与各主要航空器生产企业协同对从小型通用飞机到大型民机的各种飞行器的坠撞动力学特性及坠撞安全性问题进行了测试^[4],给之后航空器适坠性设计的发展做了先行性基础工作。

上世纪欧盟方面也开展了类似工作,称作 CRASURV 计划,该计划目的之一为验证有限元法的准确性,将有限元方法分析的结果与坠撞试验的测试结果相对比来得出结论。该计划研究方向为通过相关研究,利用复合材料革新飞机机身结构设计,以期能在可生存坠撞范围内最大程度减少对乘员生命安全的危害,并研究得出一套适用于复材民用飞机结构的试验方法^[5]。

考虑到飞机全机高昂的成本,和较长的试验周期,目前

的试验为集中于部件一级的航空适坠性试验,如地板下部结构吸能特性试验等。汽车领域与民航领域不同的是,进行全车耐撞性的试验和仿真已成为汽车界的惯例,如国内 CIRC 中保研汽车研究院对乘用车的碰撞试验等。

现今,抗坠撞研究方法主要有试验方法和数值仿真分析方法,近几十年来,有限元分析技术发展迅速,由于有限元仿真方法的较低成本和较短研究周期,国内外均利用此方法对飞机结构耐撞性进行研究,以期优化吸能结构设计。

二、民机抗坠撞设计意义

在某些极端异常坠机情况下,为缓冲飞机在坠落着地的巨大冲击能量,需要其下部的复合材料吸收、转化绝大部分的能量,进行实验探析飞机货舱下部的复合材料立柱在承受和分散碰撞冲击力的渐进压缩失效机制和吸能特性^[6]。

飞机货舱是飞机的主体结构,作为飞机的极大空间主舱,货舱里面的商业货品具有毋庸置疑的经济价值与信用地位,我们要保证货舱的相对安全,就要考虑货舱下部复合材料(主要是立柱)的受压强度与吸能特性。立柱结构是支撑飞机货舱结构强度的主要部件,在碰撞中最先与碰撞体相接触主要负责缓冲吸能,保证飞机的货舱中货物和载客的基本安全。

在飞机发生坠撞事故时,会对客舱安全产生较大影响,此时货舱地板下部结构有极大可能最先触地,下部结构中的货舱地板立柱是其关键的坠撞吸能元件。因此,针对复材货舱地板立柱在坠撞条件下的失效模式和不同构型复材立柱的吸能规律,对提高飞机适坠性设计能力,有效降低乘员过载情况,有着指导意义。

三、复合材料吸能结构研究现状

3.1 复合材料吸能结构研究

Feraboli 等建立了一种使用平板状样本和改进的抗屈曲夹具的测试装置,借助 LS-Dyna 进行数值模拟分析,其研究表明,能够通过该夹具得到拥有自稳定性的波纹型试件的吸能特性相关数据,由于平板试件的不稳定性,其吸能特性难以获得,小转角截面的立柱试件在相同质量下吸能情况最好。

国内外学者针对货舱下部支撑结构进行了大量研究, Kim 等针对几种不同种类材料的复合材料圆管的压缩吸能特性进行研究,发现碳纤维增强复合材料吸能特性最好^[7]。解江等通过改变纤维铺层角度研究对复材薄壁圆管轴向压溃吸能特性的影响,发现复合材料圆管的比吸能在纤维铺层角度从 15° 增加到 75° 之间增大,75° 之后略减小^[8]。

Jackson 对不同加载速率条件下的半圆型元件进行试验,结果表明动态压溃试验情况下,半圆型元件的比吸能比静态低 6%-15%^[9]。汪洋等对 C 型立柱的压溃试验不同加载速率下的研究表明,针对同一构型元件,动态压溃稳定压缩载荷平均值与准静态压溃条件相比有各种程度的降低^[10],同时动态压溃比吸能平均值也有一定程度降低,这与 David 和 Joosten 两者别对圆管型和“DLR”型立柱的研究结论相同。

复合材料在民用运输类飞机上的应用越来越广泛,国外航空器生产企业在大型飞机上已有大面积应用复合材料的产品如波音 787、空客 A350,它们的复合材料的使用比例均在五成左右,未来中俄联合研制的双通道民机 C929 复合材料的用量预计也将超过 50%。这是由于复合材料本身的高比强度、比刚度及高比吸能等优势。面对从未有过的复合材料使用比例,FAA 的提出了全新的咨询通报 AC20-107B 以重新明确复合材料机身结构的坠性要求,并提供了密切相关的设计、制造和维护方面的指导信息。以确保坠撞时乘员存活能力至少与类似尺寸的金属航空器相当。

相较于国外的广泛研究,复材吸能元件的准静态压溃响应和利用有限元方法对相关结构坠撞情景进行分析是国内的主要研究内容,直接应用到抗坠撞设计中仍有较大难度,改变吸能试件不同设计参数研究对元件的影响是有必要的,为货舱下部吸能结构设计供更多可能的方案。

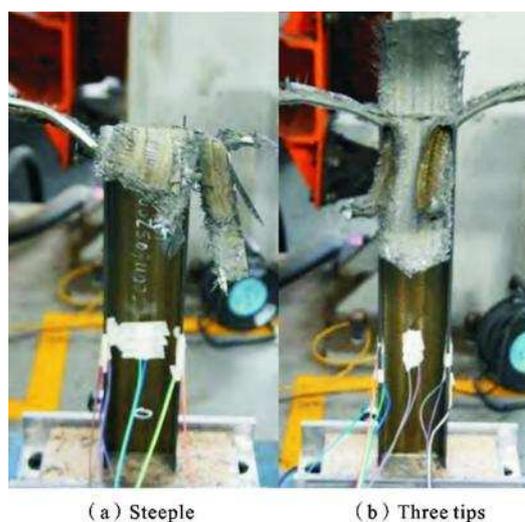


图1 不同触发方式下 T700GC 碳纤维编织/环氧树脂复合材料立柱试件变形^[10]

四、民机坠撞安全研究挑战及展望

近些年来随着对复合材料的不断研究与实践,业界已认识到未来复合材料在飞机减重、吸能部件改良方面的巨大效益。但是飞机坠撞条件实际相当复杂,受多重因素影响,

给如货舱内的行李及副油箱等,都会对坠撞的结果产生影响。由于复合材料结构失效模式和吸能机理与我们常用的金属材料不同且更为复杂,同时对复合材料吸能部件的相关研究还并不充分,大多的仿真实验还是研究复材部件在简单载荷下的吸能状况和规律,实物试验虽能较好地表现结果,但实物试验成本高、周期长又给研究增大了难度。为解决这些问题,需要发展更高精度的测试技术,结合其测试技术发展经验验证更加有效的有限元仿真分析技术,提高仿真实验准确性。

由复合材料制成的吸能元件,不仅承担着吸收能量的重任,其同时还位于机体结构的主传力路径上,而民机机身需要满足强度、疲劳容限、损伤容限、刚度等诸多要求,在进行适坠性设计时,在抗坠撞设计上要考虑复合材料吸能元件的形变空间,更应顾及到飞机在坠撞事故中还需保持一定的机体结构完整性以保证乘员的生存空间,目前主要挑战是怎样在考虑多重工程要求、不同学科参与的情况下,建设一种科学合理的吸能结构设计方法。

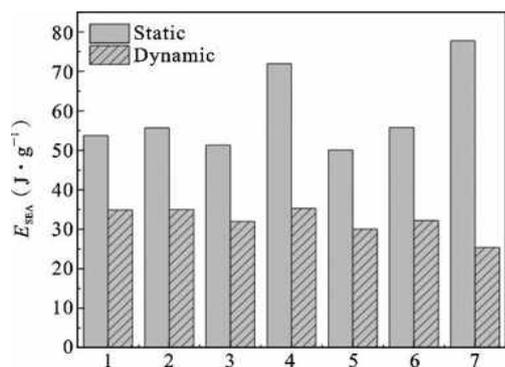


图2 静态/动态加载下 T700GC 碳纤维编织 / 环氧树脂复合材料立柱比吸能^[10]

作为民机部件,在未来使用过程中不可避免地面临高温、低温或温度急剧变化等恶劣情况,如何保证部件在较严苛的温度情况下还具有好的能量吸收能力也是未来大面积应用复材吸能部件的一大挑战。

参考文献:

[1]张晓敏.民机坠撞事故分析及典型吸能结构特性研究[D].中国民航大学, 2013.

[2]中国民用航空总局.CCAR-25-R3 中国民用航空规章:第 25 部,北京中国民用航空总局, 2001

[3]曾晓平.国外有关飞机坠毁撞击安全性资料概述,航空航天工业部 301 所, 1991.10

[4]Thomson, RG, Goetz, R.C, NASA/FAA general aviation crash dynamics program -.A statusreport, Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 20th, St. Louis, Mo, April 4-6/1979.

[5]G. Labeas, Th. Kermanidis, Crushing behaviour of the energy absorbing tensor skin panels, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures.2003.

[6]施萌, 汪洋, 吴志斌等.民机货舱下部复合材料结构抗坠撞吸能特性试验研究[J].复合材料科学与工程, 2021, No.332(09)

[7]Kim J S, Yoon H J, and Shin K B, A study on crushing behaviors of composite circular tubes with different reinforcing fiber[J].International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(4):198-207.

[8]解江, 马骥瑶, 霍雨佳, 周建, 牟浩蕾, 冯振宇.纤维铺层角度对复合材料薄壁圆管轴向压溃吸能特性影响研究[J].振动与冲击, 2018, 37(20):

[9]Jackson A, Dutton S, Gunnion A J, et al. Investigation into laminate design of open carbon-fibre/epoxy sections by quasi-static and dynamic crushing[J]. Composite Structures, 2011, 93(10):2646-2654.

[10]汪洋, 吴志斌, 刘富.复合材料货舱地板立柱压溃响应试验[J].复合材料学报, 2020:1-7.

[11]刘小川, 白春玉, 惠旭龙, 张欣玥.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(04).

作者简介: 雷翼飞 (2003-05), 男, 在校本科, 中国民航大学, 汉族, 河南洛阳人, 研究方向: 从事复合材料研究。

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(项目编号: IECAUC2022050)。