

文章编号:1674-8190(2018)03-316-10

运输类飞机“最小风险炸弹位置”的研究进展

冯振宇,周书婷,李恒晖,解江,李翰

(中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室,天津 300300)

摘要:“最小风险炸弹位置”(LRBL)是运输类飞机型号合格审定最新的客舱安保要求之一。基于 LRBL 适航要求及相关的咨询通告,针对 LRBL 周围结构和系统的设计与布局、以及爆炸发生后的次生影响和应对措施,综述了飞机结构在内爆冲击载荷作用下的响应特性及失效模式的研究进展,梳理了人体在爆炸冲击波作用下的损伤机理及损伤模型,明确了爆炸碎片的破坏概率模型,总结了国内外抗爆容器的设计特征及优缺点,最后简述了中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室为研究机身结构在内爆载荷下的响应特性所做的相关技术研究。

关键词: 小风险炸弹位置;适航;咨询通告;损伤;飞机结构;抗爆容器

中图分类号: V250

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.03.003

Research Progress on the “Least Risk Bomb Location”(LRBL) for Transport Aircraft

Feng Zhenyu, Zhou Shuting, Li Henghui, Xie Jiang, Li Han

(Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The LRBL is one of the latest cabin security requirement for transport aircraft certification. According to (least risk bomb location, LRBL) airworthiness requirements and related advisory circular, based on design and layout of structures and systems around LRBL and the secondary effects and countermeasures after the explosion, the research progress on response characteristics and failure modes of aircraft structure subjected to internal explosion is discussed. The damage mechanism and damage model of human organs under blast shock wave is combed. The probability model of explosive debris is cleared. The design characteristics, advantages and disadvantages of blast-resistant containers at home and abroad is summarized. The related project studies on the response of fuselage structures under internal explosive load of Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China are briefly described.

Key words: least risk bomb location; airworthiness; advisory circular; damage; aircraft structure; blast-resistant containers

0 引言

近年来,随着恐怖袭击事件的不断增多,民航客机经常成为恐怖袭击的对象。而炸弹作为其常

用的袭击破坏手段,一旦引爆将对飞机结构造成致命性的破坏,例如 1988 年的洛克比空难。2008 年 10 月 28 日,美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration,简称 FAA)颁布 FAR 25-127 修正案^[1],要求制造商针对最大合格审定客座量大于 60 或起飞总重超过 100 000 lb(45 359 kg)的飞机,必须设计一个“最小风险炸弹位置^[2](Least Risk Bomb Location,简称 LRBL)”,用于放置发现的可疑装置,通过结构和系统的综合设计,使得关系飞机安全的

收稿日期:2017-11-14; 修回日期:2018-01-21

基金项目:中央高校基本科研业务费(3122017089)

通信作者:冯振宇,caucstructure@163.com

关键结构和系统在其一旦爆炸后能够得到最大程度的保护,从而有效提高飞机的安保水平。

针对此适航要求,FAA 颁布了咨询通告 AC 25.795-6^[3],给出了推荐的 LRBL 符合性方法。该咨询通告指出,表明符合性时既要考虑 LRBL 周围结构和系统的设计与布局,即必须计算分析或/和试验评估机体结构的承载能力确保飞机结构及系统的完整性,将损失降到最小,也要评估爆炸发生后的次生影响以及应对措施,即在设计 LRBL 时,应当考虑到包括碎片被吸入发动机及乘员损伤在内的次生影响,并指出当飞行中发现可疑装置时,可以使用爆炸包容系统来降低爆炸的影响。

然而,爆炸力学在民航领域的应用较少,AC 25.795-6 中未提及制定 LRBL 符合性方法的关键依据,且国外的相关技术信息敏感,不对外公开。另外,我国正在研制国产大型客机,飞机安保设计也在力求达到 FAR 25-127 修正案的水平。即在该修正案生效后申请取证的运输类飞机,都必须考虑这一适航要求。但是我国最新的 CCAR 25-R4 对 LRBL 适航要求暂无修订,更没有专门的针对 LRBL 的符合性研究。因此,适航当局与制造商在面对这一新要求时,迫切地需要开展相关的研究来支持适航审定与型号设计。

本文基于 LRBL 适航要求及相关的咨询通告,针对飞机结构的爆炸冲击响应、人体冲击损伤、爆炸碎片及抗爆容器等方面的研究进展进行综述,并介绍中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室的相关技术研究,指出进一步需要研究的问题,旨在为 LRBL 的适航审定与型号设计提供有效的指导。

1 飞机结构的爆炸冲击响应

AC 25.795-6 指出 LRBL 必须避开飞机的关键结构及系统,且需考虑该位置结构的破坏对飞机结构完整性的影响。由于爆炸物对飞机的破坏作用主要来自于炸药爆炸后产生的高速高压冲击波,特别是对完全增压的飞机,爆炸造成的损伤将越加显著。

预测爆炸对飞机结构的冲击响应的早期尝试是由 R. C. DeHart 等^[4]进行的,R. C. DeHart 等基于弹性动力分析理论,对飞机结构各构件的动态响应进行了理论推算,为机身的设计以及机身极限承载的确定提供了理论依据。到 20 世纪 70 年代,

FAA 针对特定机型(B727-100、DC-9、B747-100 和 L-1011)开展了最小风险炸弹位置的评估研究^[5-8],说明了诸如厨房、应急舱门、后承压框、行李架等不同 LRBL 设计方案的设计原则、特征及优缺点;提出了 LRBL 的估测流程为:在选定的位置放置爆炸源,计算作用于机身内部的压力冲量,将动载简化等效为静载并与蒙皮壁板的承载能力进行比较,当等效静载超过极限载荷时,失效发生。这一方法是采用等效近似的方法进行的理论计算,尽管其为 LRBL 的评估提供了有效的指导,但已无法满足目前计算精度与安全性的需要。

洛克比空难后的机身损伤形貌图如图 1 所示^[9],在 1988 年洛克比空难之后,美国和欧洲加大了航空安保领域技术研究的投入。开展了 140 次内爆载荷下的机身易损性试验(其中窄体客机 98 次,宽体客机 42 次)、200 多次支持性试验(主要是研究乘员的手提行李以及货舱的托运行李对爆炸效应的抑制作用)以及 104 次减缓爆炸结构设计的验证试验(包括客舱抗爆衬垫、货舱衬垫、宽体客机强化的货舱集装箱和验证最小风险炸弹位置的程序);建立了简单的圆筒结构以及 B-52、B707 等全尺寸飞机模型,分析了冲击波和机身的相互作用,提出了商用飞机“易损性分布图”的概念,如图 2~图 3 所示^[10-12]。可以看出:确定位置下的造成飞机无法安全着陆的最小炸弹当量。

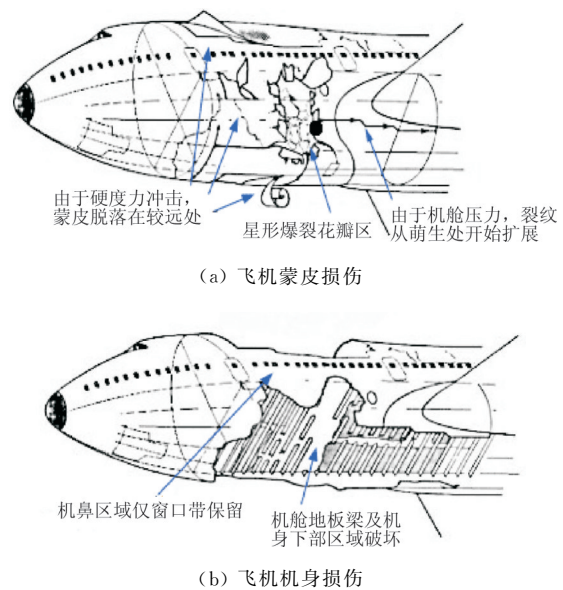


图 1 洛克比空难后的机身损伤形貌图

Fig. 1 Aircraft fuselage damage morphology after the Lockerbie bombing

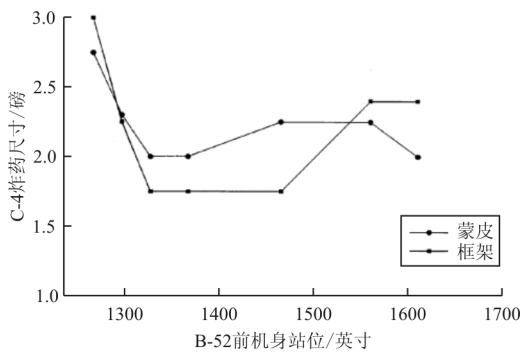


图 2 B-52 机身易损性分布图

Fig. 2 Vulnerability map of B-52

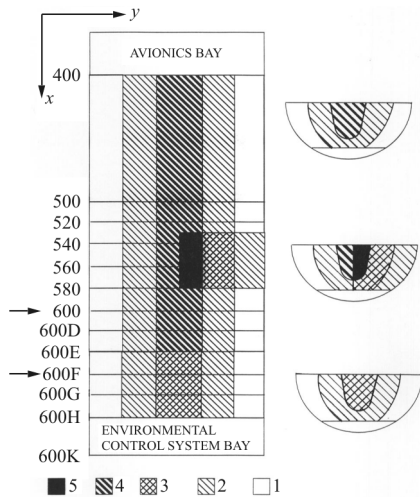


图 3 B-707 机身易损性分布图

Fig. 3 Vulnerability map of B-707

20 世纪末,英国民用航空管理局(Civil Aviation Authority,简称 CAA)的 Hardening 项目^[13]发展了数值仿真计算的能力,并在此研究基础上,提出了多种飞机结构强化技术,例如局部加强机身蒙皮或框段、强化货舱行李包容系统及衬垫、加强系统保护以及增加货舱行李包容系统与飞机蒙皮的距离等,以保障飞机的安全运营。

进入 21 世纪,欧洲的多个机构,包括高校、公司、科研机构,在欧盟第六框架项目的支持下发起了 VULCAN 项目,旨在发展新材料、新方法/策略,来防止因爆炸造成的灾难性事故。VULCAN 项目采用“积木式方法”(如图 4 所示)进行了研究,从较小的结构元件(试样、加强板、装配体、加压蒙皮)到全机身结构,研究了不同材料(金属、复合材料以及 GLARE)的结构在爆炸载荷作用下的结构

响应。例如,C. Soutis 等^[14]对 GLARE 层板进行了爆炸仿真模拟,研究了 GLARE 在爆炸载荷作用下的非线性动态响应,并与 G. S. Langdon 等^[15]的试验结果进行了对比,得到了较好的吻合度。T. Kotzakolios 等^[16]和 A. Dacko 等^[17-18]建立了两个典型商用运输类飞机的机身结构有限元模型,分别采用铝和 GLARE 材料,针对不同的炸药位置进行了数值模拟,得到了结构不同损伤位置下的不同损伤程度。另外,VULCAN 项目还在设计和材料应用方面提出了强化策略,例如,对于铝合金飞机结构,提出在蒙皮、桁条和框架之间增加螺栓连接,如图 5(a)所示;对于复合材料飞机结构,提出将长桁与蒙皮先进行粘合,然后再在框架与蒙皮之间增加螺栓连接,如图 5(b)所示。

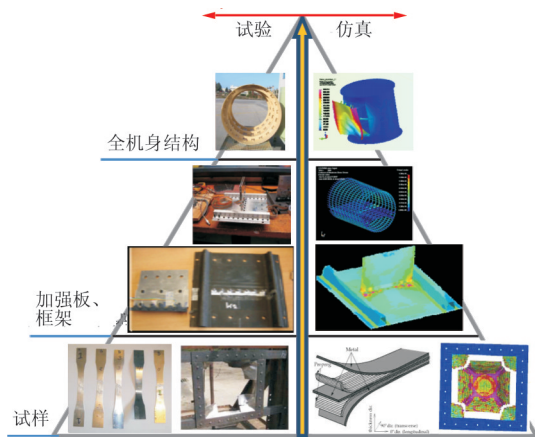
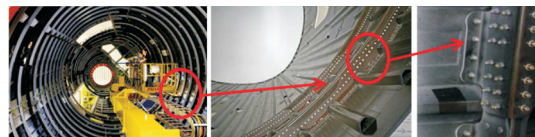


图 4 积木式研究图

Fig. 4 Building block research



(a) 铝合金飞机结构强化



(b) 复合材料飞机结构强化

图 5 强化策略

Fig. 5 Hardening strategy

2 人体冲击损伤

AC 25.795-6 指出在设计 LRBL 时,除了考虑结构本身的设计以外,还应考虑包括乘员损伤在内的次生影响。炸药在爆炸时对人体的作用及伤害是多重效应共同作用的结果,包括冲击损伤、破片损伤、加速-碰撞损伤、热损伤等。其中,冲击损伤的研究较为关键。经过几十年的发展,冲击损伤的研究经历了动物试验、损伤机制分析、数学建模以及计算机数值模拟研究几个阶段。

炸药爆炸产生的冲击波将造成人体器官的创伤,尤其是肺。其损伤程度取决于炸药的威力、受伤者离爆炸点的距离、爆炸发生的空间性质以及炸弹碎片的性质。针对冲击损伤研究,最为著名的是 I. G. Bowen, J. H. Stuhmiller 等和 H. Axelsson 等基于动物(羊)试验数据,提出的损伤模型。三种损伤模型的对比如表 1 所示。

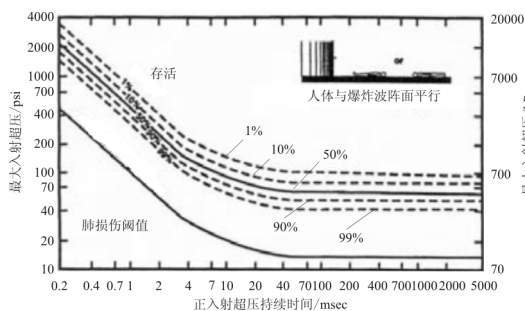
表 1 损伤模型的对比

Table 1 Comparison of injury models

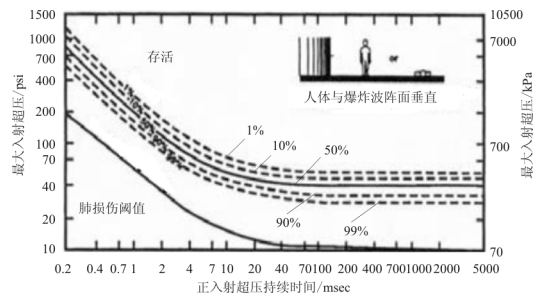
模型	是否适用理想波	是否适用复杂波	考虑器官
Bowen	是	否	肺
Stuhmiller	是	是	肺
Axelsson	是	是	所有内部器官

2.1 Bowen 模型

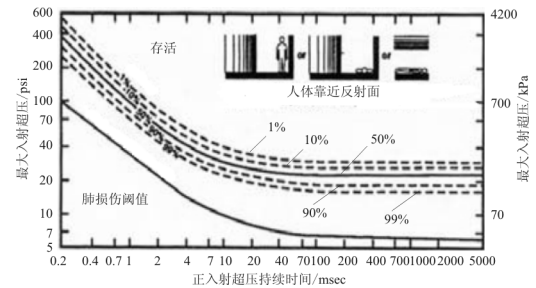
Bowen 模型^[19]集中在肺损伤,其根据爆炸试验建立了爆炸创伤病理学数据库,针对 70 kg 人体不同方向的受载绘制了著名的 Bowen 创伤曲线,如图 6 所示。Bowen 创伤曲线的局限之处在于只针对理想的爆炸冲击波。



(a) 人体与爆炸波阵面平行



(b) 人体与爆炸波阵面垂直



(c) 人体靠近反射面

图 6 Bowen 创伤曲线

Fig. 6 Bowen trauma curve

2.2 Stuhmiller 模型

J. H. Stuhmiller 等^[20]于 1984 年在人体躯干模型周围布放了压力传感器研究自由场冲击波作用时人体表面的载荷变化过程。随后在 1996 年又建立了人体胸部简化的动力学模型^[21],考虑了由于爆炸负荷产生的荷载,由于肺的体积压缩产生的内部压力以及由于胸部运动产生的压缩波,以冲击波对肺组织所作的功为参考量,获得了肺组织各个创伤等级所占的比率,推导公式^[21]如下:

$$p(t) \cong p_0 + \rho_0 c_0 v \quad (1)$$

$$c_0^2 = \gamma \frac{p_0}{\rho_0} \quad (2)$$

$$m \frac{dv}{dt} = p_{load}(t) - \alpha_0 v - p_0 \frac{x}{L} \quad (3)$$

$$\omega^* = \frac{W}{p_0 V} = \frac{1}{p_0 L} \int_0^\infty \rho_0 c_0 v^2 dt \quad (4)$$

式中: p 为压力; p_0 为正常肺的压力; ρ_0 为正常肺的密度; c_0 为正常肺的声速; v 为活塞速度; γ 为比热比; x 为位移; m 为质量; L 为肺跟胸腔面积的比值; ω^* 为正常功; ω 为总功。

2004 年, J. H. Stuhmiller 研制出了爆炸冲击波对肺创伤的评估软件 Injury, 此评估软件的开发对于人体爆炸冲击损伤的研究起到了巨大的推动

作用,所需输入参数是爆炸载荷、物种、冲击次数、大气压力以及起始和结束时间,计算结果是肺损伤的概率,定义的5个伤害级别分别为严重、中度、轻微、留有痕迹和无痕迹。

2.3 Axelsson 模型

Axelsson 的损伤模型^[22]包括对所有易受伤害的内部器官/系统的损伤。H. Axelsson 基于 J. T. Yelverton 的试验研究结果,建立了由弹簧、质量、阻尼器系统构成的简化的人体胸部动力学模型,如图7所示。该模型将冲击波测量数据作为输入参数,通过计算胸壁运动速度及肺腔中的压力变化,评估了胸腔内各个器官的创伤程度。但是 Axelsson 方法只能了解冲击波对生物胸部内部的生物器官创伤程度的范围,并没有具体分析爆炸波对生物组织产生各个等级创伤所占比率。模型方程如下:

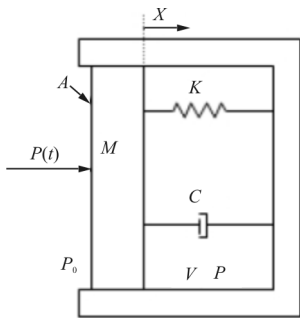


图7 Axelsson 模型

Fig. 7 Model Axelsson

$$M = \frac{d^2 X}{dt^2} + C \frac{dX}{dt} + KX$$

$$= \left[P(t) + P_0 - \left(\frac{V}{V - AX} \right)^\gamma P_0 \right] \quad (5)$$

式中: A 为有效面积; M 为有效质量; V 为肺的初始气体体积; X 为位移; C 为阻尼系数; K 为弹簧系数; P_0 为环境压力; $P(t)$ 为即时超压; γ 为肺中气体的多变指数。

2.4 其他

除了上述三种著名的人体损伤模型研究,国内外其他学者的工作也在积极开展。周杰等^[23]通过去除模型中的撞击系统及完善胸部左-右部分的数学模型,获得了爆炸作用下的人体胸部动力学模型。将试验数据加载到模型的前、后、左、右位置作

为边界条件,计算分析胸部各个方向的运动速度、位移、肺腔内压及肺组织中的压力波变化规律,利用归一化功与肺组织创伤的关系,评估了肺组织的创伤。W. E. Baker 等^[24]以人垂直站在或水平躺在平整地面上时,冲击波传播方向与身高方向垂直,周围无障碍物(这是最典型的暴露情形)这一假定为基础,根据 Lovelace 基金会的研究成果,推导了关于肺伤害人员的死亡率曲线。

相比于动物试验的高成本和低精度,数值模拟研究逐渐体现了其优越性。周杰等^[25-26]进一步采用数值模拟方法,分析了人体胸部在自由空间爆炸场中受冲击波作用的力学过程,参照 Bowen 损伤曲线评估出了肺的损伤状态,并改进了 T. E. Lobdel^[27]的人体胸部创伤模型,推导了模型的动力学方程,选择了合理的计算方法。康建毅等^[28]通过 CT 扫描完成了人体胸部三维表面模型的建立,探讨了冲击波载荷下的人体胸部周围压力的分布及肺脏的应力分部规律。A. I. D'yachenko 等^[29]建立了一维有限元肺模型,并选用粘弹性材料模型研究了冲击波传播造成肺的损伤。

3 爆炸碎片

AC 25.795-6 指出在设定 LRBL 时,除了结构本身的设计以外,还需要考虑包括碎片造成的飞机损伤在内的次生影响。因为抛射碎片具有非常大的速度和能量,如果击中飞机关键结构(例如机翼),或是被吸入发动机,将会造成非常严重的后果。

针对爆炸产生的碎片抛射危害的研究,目前多集中在碎片的产生、抛射、击中及对目标的损坏等方面,旨在明确爆炸碎片的抛射速度及飞行轨迹。U. Hauptmanns 等^[30-31]通过 Monte-Carlo 方法对碎片抛射的随机性进行了分析,求取了碎片对水平物体的破坏概率。R. Pula^[32]和 G. Gubinelli 等^[33]基于二维抛射的随机轨迹方程建立了各自的破坏概率模型,考虑了简化的目标物体形状对破坏概率的影响。二维抛射碎片飞行轨迹如图8所示^[32]。Q. B. Nguyen 等^[34]基于碎片抛射轨迹和目标物体的三维方程建立了破坏概率模型,其认为当受撞击的目标物体的残余壁厚小于某个临界值时,结构就会发生破坏,三维抛射碎片轨迹抛射筒图如图9所示。尽管起步较晚,国内学者也在积极开展研究,

张新梅等^[35] 推导了爆炸碎片抛射速度的计算公式, 构建了爆炸碎片的飞行加速度方程, 确定了求解爆炸碎片飞行轨迹及抛射速度的计算方法。韩晨曦等^[36] 综述了过程设备中由于爆炸可能产生的碎片的抛射危害概率, 对碎片的产生、抛射以及对目标碰撞过程中各不确定参数所符合的概率分布进行了整理分析。赵敏等^[37] 通过数值模拟的方法, 得到了爆炸储罐在爆炸后所产生的碎片轨迹。朱东^[38] 研究了储罐在遭受撞击和爆炸荷载下的动力响应。

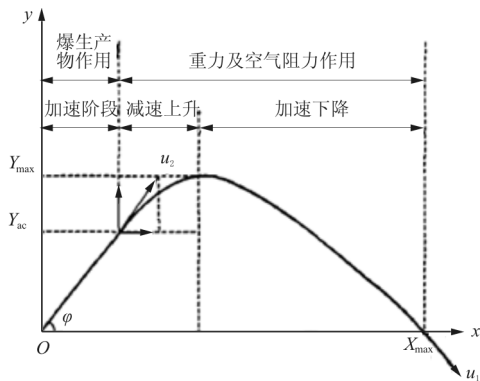


图 8 二维抛射碎片轨迹示意图

Fig. 8 Schematic of trajectories of two-dimensional projectile fragments

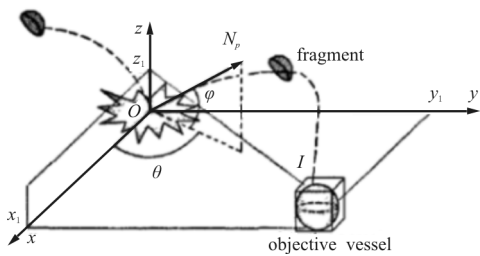


图 9 三维抛射碎片轨迹示意图

Fig. 9 Schematic of trajectories of two-dimensional projectile fragments

4 抗爆容器

AC 25.795-6 中说明可以采用炸弹包容系统 (Containment System), 即抗爆容器, 来达到降低爆炸影响的目的。抗爆容器能限制系统内部炸药爆炸产生的冲击波、爆轰产物和破片的作用范围, 有效保护人员、设备和环境的安全。最初, 抗爆容器以传统的金属抗爆容器为主。随着新材料的开发及 1946 年纤维缠绕技术的出现, 轻质高强的新

型复合材料抗爆容器开始发展。相比传统的金属抗爆容器, 复合材料容器质量轻、强度高、刚性好、抗爆性能佳并且设计灵活。经过几十年的发展, 到 20 世纪 90 年代, 经过各国学者的努力, 抗爆容器在理论研究、试验研究及应用上都取得了较大的进展。我国对于抗爆容器的研究起步较晚, 从 20 世纪 80 年代开始至今, 包括中国工程物理研究院、北京理工大学、国防科技大学以及西北核技术所等都在开展相关方面的研究工作。

针对航空应用的抗爆容器的研究, 始于 20 世纪 90 年代。当时, FAA 评估认为当时的货舱行李集装箱的抗爆能力有限, 发起了货舱集装箱的加强技术研究。CAA^[13] 开发了加强的行李集装箱来减弱飞行中爆炸产生的影响, 如图 10 所示。但其重量大, 成本高且不适用于大多数窄体客机, 最终没有得到广泛的使用。

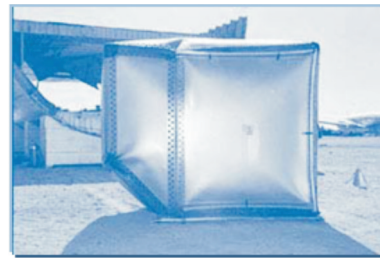


图 10 强化的行李集装箱

Fig. 10 Hardened luggage container

21 世纪, D. Zangani 等^[39] 提出了采用新型纺织材料和复合材料组合使用的方法实现了行李集装箱的高柔, 高强及灵活的可设计性, 并且其质轻, 可以同时宽体和窄体客机中使用。2015 年, 科加雷姆航空公司的 9268 号航班发生炸弹爆炸, 航空界开始更加关注增强飞机生存性的问题。对此, 欧洲于 2015 年 9 月完成的一项名为“飞行包裹”的研究项目开发出了行李集装箱, 如图 11 所示^[40]。



图 11 飞行包裹

Fig. 11 Flying bag

与 20 世纪 90 年代测试的重量大、成本高的爆炸硬化金属容器不同,“飞行包裹”采用了具有高强度、高抗冲击和防热特性的组合纤维织物,可以用在窄体和宽体飞机上。

可见,抗爆容器的设计特征为质轻、高强、能包容碎片,在内爆载荷下不发生撕裂。尽管发展迅速,可是目前抗爆容器的发展还存在尺寸效应(随着特征尺寸的增大,结构的强度和塑性变形能力下降,并有从韧性断裂转为脆性断裂的趋势,其存在会大大降低抗爆容器的极限承载能力)的问题,应用还不成熟,尚在研究之中。抗爆容器作为未来的设计发展趋势将会有很大的发展空间。

5 技术研究

由于民航安全/反恐的迫切需要以及适航审定与符合性方法的技术基础需要,中国民航大学天津市民用航空器适航与维修重点实验室在民航局安全能力项目以及中央高校基金项目的支撑下,梳理了与最小风险炸弹位置相关的适航要求与典型案例;通过对典型航空铝合金进行动态力学性能试验与爆炸试验,获得其力学性能数据及破坏失效模式;通过对爆炸冲击载荷作用下的结构进行建模与数值计算,评估了材料的不同本构模型和失效参数的局限性与适用性;发展并建立了适用于 LRBL 适航要求的结构响应与失效分析方法。

5.1 2024-T3 铝合金材料力学性能研究

为了确定航空铝合金材料的动态力学性能,采用霍普金森压杆(SHPB)试验测试铝合金 2024-T3 材料在不同应变率($10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$)下的应力应变数据,基于获得的力学性能数据对 Johnson-Cook 本构方程中的参数进行拟合,从而建立材料的 Johnson-Cook 本构方程,为爆炸冲击载荷下结构的响应与失效分析提供可靠的材料模型。

5.2 爆炸载荷下铝合金平板试验与仿真研究

为了明确航空铝合金薄板结构在爆炸冲击载荷下的动态响应及失效模式,针对固支铝合金圆板以药量及爆距为变量进行了爆炸冲击试验,试验布置如图 12 所示^[41]。基于试验,利用 LS-DYNA 建立相应的数值仿真模型,分析了不同的 ALE 运

步算法、流固耦合方式、耦合点数量、平板网格尺寸、平板单元类型对于数值模拟结果的影响,以建立有效的数值模拟方法。最终通过经验证的数值模拟方法,在试验的基础上扩大分析矩阵,分析了近爆场下固支铝合金圆板在不同药量、不同爆距以及不同比例距离下的动态力学响应特性及变形失效行为,分析结果如图 13 所示。

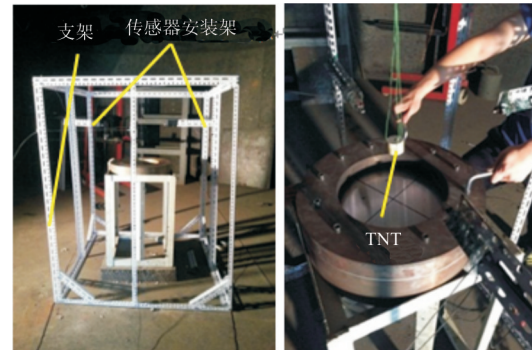
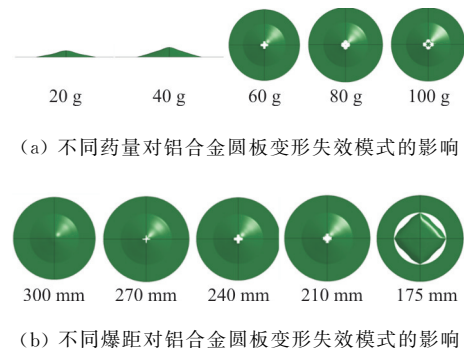


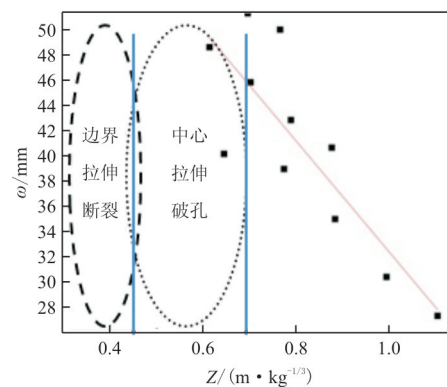
图 12 试验布置

Fig. 12 Test layout



(a) 不同药量对铝合金圆板变形失效模式的影响

(b) 不同爆距对铝合金圆板变形失效模式的影响



(c) 不同比例距离对铝合金圆板变形失效模式的影响

图 13 近爆场下固支铝合金圆板的动态响应

Fig. 13 Dynamic response of fully clamped circular aluminum alloy plate subjected to near field explosion

5.3 爆炸载荷下铝合金机身筒段模型试验与仿真研究

为了探索典型机身结构在内爆冲击载荷下的结构响应及失效模式,通过铝合金机身筒段模型(包含蒙皮、框、长桁、角片等典型航空结构件)试验分析了整体模型、连接件及连接方式对机身结构动态特性的影响。在试验的基础上,基于 LS-DYNA,建立了机身筒段模型,研究了其在不同炸药量、不同爆距、以及不同炸药位置(机身中部或两框之间)下的结构动态响应及失效模式。机身筒段模型及分析结果如图 14~图 15 所示^[42]。

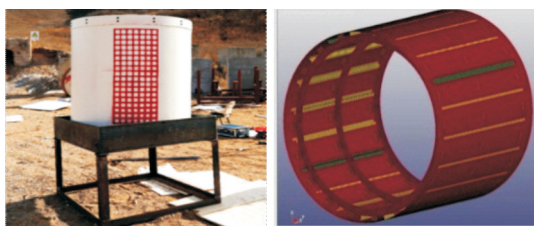


图 14 机身筒段模型

Fig. 14 Aircraft fuselage substructure

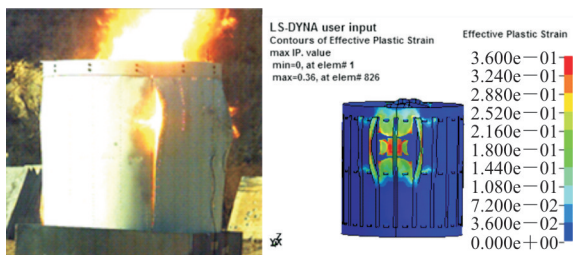


图 15 机身筒段模型分析结果

Fig. 15 Analysis results of aircraft fuselage substructure

6 结束语

针对目前国际反恐形势的日益严峻,美国以及欧洲发达国家在民用客机安保方面的研究已经积累了数十年经验,FAA 颁布的针对民用客机安保措施的适航条款中提出了“最小风险炸弹位置(LRBL)”,给出了相应的咨询通告及修正案。并在过去的几十年中,开展了大量的相关技术研究。

考虑到目前我国正积极推进国产大型客机的研制,本文综述了飞机结构在内爆冲击载荷作用下的响应及失效模式的研究进展;总结了爆炸冲击波对人体的损伤问题,分析了人体器官在爆炸冲击波

作用下的损伤机理和评估损伤模型;明确了爆炸碎片的破坏概率模型;针对国内外对抗爆容器的研究现状,总结了抗爆容器的设计特征及优缺点;简述了为获得典型机身结构在内爆冲击载荷作用下的动态特性开展的研究工作。

为了更全面、客观地研究飞机内爆问题、提高我国运输类飞机的安全技术水平。未来建议加强以下三个方面的研究:

(1) 加强客舱增压对爆炸冲击载荷下机身结构动态特性的影响研究

飞机在完全增压的情况下发生爆炸,损伤是最大的。在大多数情况下,当在飞机中发现可疑装置时,优先采取将客舱压差降低到 0,作为即时的有效措施。客舱和外界空气之间的压差作为一个关键参数对于 LRBL 程序的有效性是非常显著的,因此建议针对客舱增压对机身结构动态特性的影响开展研究工作。

(2) 加强典型连接件在爆炸冲击载荷下的响应与失效模式研究

根据所开展的机身圆筒模型爆炸试验发现,连接件的失效是主要的形式之一,且与连接方式、工艺、连接件材料、规格等具有密切联系,是影响结构整体响应与失效的关键因素之一,在掌握平板爆炸响应与失效行为的基础上,有必要针对典型机身连接结构在爆炸冲击载荷作用下的响应与失效行为开展研究工作,进一步提高机身结构的抗爆能力。

(3) 加强包容系统的适航审定技术研究

包容系统是应急处置爆炸可疑装置的另一个有效方法。已有研究机构研发出具有抗爆功能的包容系统或类似设施设备。如何保证该类系统的有效性、应如何制定相关标准或规范以及制造方如何向局方表明符合性,是民航业应对炸弹袭击可能遇到的另一个问题。因此建议开展相关的工作,特别是包容系统抗爆符合性的适航审定技术研究工作。

参考文献

- [1] FAA. FAR Part 25 Amendment No: 25-127. Security considerations requirements for transport category airplanes [S]. United States: Federal Aviation Administration, 1965.
- [2] FAA. 14 CFR Parts 25. Airworthiness standards: transport

- category airplane[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2013.
- [3] FAA. AC No: 25.795-6. Least risk bomb location[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1993.
- [4] Dehart R C, Basdekas N L. Blast response of a typical aircraft fuselage structure[R]. San Antonio: Southwest Research, 1962.
- [5] Box P O. Boeing 727-100 safe bomb location study[R]. FAA-RD-72-94, Washington: Federal Aviation Administration, 1972.
- [6] Jack Avery, Bill Chang, Ray White. Boeing 747-100 safe bomb location study[R]. FAA-RD-74-201, Washington: Federal Aviation Administration, 1974.
- [7] Darling R E. DC-9 safe bomb location study[R]. FAA-RD-72-88, Washington: Federal Aviation Administration, 1973.
- [8] Himmel E J. Lockheed L-1011 safe bomb location study[R]. FAA-RD-74-202, Washington: Federal Aviation Administration, 1974.
- [9] Air Accidents Investigation Branch. Report on the accident to Boeing 747-121[R]. London: AAIB, 1990.
- [10] Geetha Bharatram. Vulnerability analysis of aircraft fuselage subjected to internal detonations[C]. Los Angeles, Calif: The Corporation, 1994.
- [11] Moon Y I, Bharatram G. A vulnerability map of a commercial aircraft[C]. Los Angeles, Calif: The Corporation, 1996.
- [12] Moon Y I, Bharatram G. Vulnerability and survivability analysis of aircraft fuselage subjected to internal detonations[C]. Los Angeles, Calif: The Corporation, 1995.
- [13] Authority, Civil Aviation. Aircraft hardening research programme-Final overview report[R]. Technical Report 2001/9, London: CAA, 2001.
- [14] Soutis C, Mohamed G, Hodzic A. Multimaterial arbitrary-lagrangian-eulerian formulation for blast-induced fluid-structure interaction in fiber-metal laminates[J]. *AIAA Journal*, 2012, 50(9): 1826-1833.
- [15] Langdon G S, Chi Y, Nurick G N, et al. Response of GLARE panels to blast loading[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(12): 3116-3120.
- [16] Kotzakolios T, Vlachos D E, Kostopoulos V. Blast response of metal composite laminate fuselage structures using finite element modelling[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 665-681.
- [17] Dacko A, Toczyski J. Vulnerability analysis of aircraft fuselage subjected to internal explosion[J]. *Archive of Mechanical Engineering*, 2011, 58(4): 393-406.
- [18] Dacko A, Toczyski J. Structural response of a blast loaded fuselage[J]. *Journal of Kones*, 2010, 17: 101-109.
- [19] Bowen I G, Fletcher E R, Richmond D R. Estimate of man's tolerance to the direct effects of air blast[R]. Lovelace Foundation for Medical Education and Research Albuquerque DASA2113, Washington: headquarters defense atomic support agency, 1968.
- [20] Stuhmiller J H. Characterization and modeling of thoraco-abdominal response of blast waves[R]. Blast Load Definition on a Torso Model, San Diego: CA, 1984.
- [21] Stuhmiller J H, Ho K H, Vander Vorst M J, et al. A model of blast overpressure injury to the lung[J]. *Journal of Biomechanics*, 1996, 29(2): 227-234.
- [22] Axelsson H, Yelverton J T. Chest wall velocity as a predictor of nonauditory blast injury in a complex wave environment[J]. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 1996, 40(3S): s31-s37.
- [23] 周杰, 陶钢. 人体胸部爆炸冲击波创伤模型与评估[J]. *弹道学报*, 2013, 25(3): 64-69.
Zhou Jie, Tao Gang. Injury model and assessment for human torax under blast wave[J]. *Journal of Ballistics*, 2013, 25(3): 64-69. (in Chinese)
- [24] Baker W E, Cox P A, Kulesz J J, et al. Explosion hazards and evaluation[J]. *Journal of Occupational Accidents*, 1983, 5(3): 211-212.
- [25] 周杰, 陶钢, 潘保青, 等. 爆炸冲击波对人体胸部创伤机理的有限元方法研究[J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(3): 315-320.
Zhou Jie, Tao Gang, Pan Baoqing, et al. Mechanism of blast trauma to human thorax: A finite element study[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(3): 315-320. (in Chinese)
- [26] 周杰, 陶钢, 王健. 爆炸冲击波对肺损伤的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(4): 418-422.
Zhou Jie, Tao Gang, Wang Jian. Numerical simulation of lung injury induced by shock wave[J]. *Explosion and shock waves*, 2012, 32(4): 418-422. (in Chinese)
- [27] Lobdell T E, Kroell C K, Schneider D C, et al. Impact response of the human thorax[M] // *Human Impact Response*. Boston: Springer, 1973: 201-245.
- [28] 康建毅, 王建民, 喻永敏, 等. 爆炸冲击波载荷下的人体胸部有限元模型数值模拟研究[J]. *第三军医大学学报*, 2011, 33(2): 173-176.
Kang Jianyi, Wang Jianmin, Yu Yongmin, et al. Finite element numerical simulation of human thorax loaded by blast-wave[J]. *Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae*, 2011, 33(2): 173-176. (in Chinese)
- [29] D'Yachenko A I, Manyuhina O V. Modeling of weak blast wave propagation in the lung[J]. *Journal of Biomechanics*, 2006, 39(11): 2113-2122.
- [30] Hauptmanns U. A Monte Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2001, 16(4): 307-312.
- [31] Hauptmanns U. A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(5): 395-402.

- [32] Pula R, Khan F I, Veitch B, et al. A model for estimating the probability of missile impact: Missiles originating from bursting horizontal cylindrical vessels[J]. *Process Safety Progress*, 2007, 26(2): 129-139.
- [33] Gubinelli G, Zanelli S, Cozzani V. A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, 116(3): 175.
- [34] Nguyen Q B, Mebarki A, Saada R A, et al. Integrated probabilistic framework for domino effect and risk analysis [J]. *Advances in Engineering Software*, 2009, 40(9): 892-901.
- [35] 张新梅, 陈国华. 爆炸碎片抛射速度及飞行轨迹分析方法[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 37(4): 106-110.
Zhang Xinmei, Chen Guohua. Approach to decoupling of multi-dimension sensing information based on multi-scale approximation[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2009, 37(4): 106-110. (in Chinese)
- [36] 韩晨曦, 赵垒. 过程设备爆炸碎片抛射危害的概率研究述评[J]. *消防科学与技术*, 2013, 32(9): 956-960.
Han Chenxi, Zhao Lei. Review of the projectile hazard probability research of fragments derived from process equipment explosion [J]. *Fire Science and Technology*, 2013, 32(9): 956-960. (in Chinese)
- [37] 赵敏, 杨泽平, 汤新天, 等. 化工储罐爆炸碎片轨迹及拦截的计算机模拟研究与应用[J]. *计算机时代*, 2017(6): 16-18.
Zhao Min, Yang Zeping, Tang Xintian, et al. Research and application of computer simulation of explosion debris trajectory and interception of chemical storage tank[J]. *Computer Era*, 2017(6): 16-18. (in Chinese)
- [38] 朱东. 大型钢储罐在撞击和爆炸荷载作用下的动力响应分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
Zhu Dong. Dynamic response analysis of large steel tank of the impact load and explosion load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [39] Zangani D, Ambrosetti S, Bozzolo A, et al. Textile-based luggage containers for onboard blast protection[J]. *Sae International Journal of Aerospace*, 2011, 4(2): 690-698.
- [40] 中国航空报. 2016 年最值得关注的民用航空技术[DB/OL]. [2018-01-21]. <http://www.macau-airport.com/cn/media-centre/news/news/15965>, 2016.
China Aviation News. Civilian aviation technology that merits attention most in 2016[DB/OL]. [2018-01-21]. <http://www.macau-airport.com/cn/media-centre/news/news/15965>, 2016. (in Chinese)
- [41] 解江, 李翰, 周书婷, 等. 爆炸冲击载荷下航空铝合金平板动态响应数值分析方法[J]. *应用数学和力学*, 2017, 38(4): 410-420.
Xie Jiang, Li Han, Zhou Shuting, et al. A numerical method for dynamic responses of aviation aluminum alloy plates under blast loads[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2017, 38(4): 410-420. (in Chinese)
- [42] 郑金国. 内爆载荷下铝合金机身结构动态响应数值仿真研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
Zheng Jinguo. Numerical simulation research on dynamic response of aluminum alloy structure under implosion loading[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)

作者简介:

冯振宇(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:飞机结构强度。

周书婷(1993—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构强度。

李恒晖(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞机结构强度。

解江(1982—),男,博士,助理研究员。主要研究方向:飞机结构强度。

李翰(1986—),男,博士研究生,助理研究员。主要研究方向:飞机结构强度。

(编辑:赵毓梅)