

文章编号: 1674-8190(2023)06-029-08

# 机翼油箱口盖的抗冲击性能研究进展

蔡玄龙<sup>1</sup>, 彭国辉<sup>2</sup>, 张兆峰<sup>1</sup>, 李小慧<sup>1</sup>, 康亦杰<sup>2</sup>

(1. 上海材料研究所 上海市工程材料应用评价重点实验室, 上海 200437)

(2. 上海飞机设计研究院 飞机结构强度工程技术所, 上海 201210)

**摘要:** 机翼油箱口盖与其周围的机翼外板共同构成飞机气动外形的一部分, 飞机在服役过程中, 油箱口盖无法避免地会遭受外物的撞击, 确保油箱口盖的抗冲击性能对保证飞机安全性具有重要的意义。本文从适航法规要求、常用材料和结构形式、考核方法与评价3个方面系统地介绍了机翼油箱口盖抗冲击性能的研究进展, 总结了目前的研究结论, 并对未来机翼油箱口盖的发展进行了展望, 可为后续新型口盖的设计和制造提供一定的理论和技术参考。

**关键词:** 机翼油箱口盖; 适航法规; 抗冲击性能; 研究进展

中图分类号: V224

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.03

## Research progress on impact resistance wing fuel tank cover

CAI Xuanlong<sup>1</sup>, PENG Guohui<sup>2</sup>, ZHANG Zhaofeng<sup>1</sup>, LI Xiaohui<sup>1</sup>, KANG Yijie<sup>2</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation,  
Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

(2. Structure and Stress Division, Shanghai Aircraft Design and Research  
Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** The wing fuel tank cover and its surrounding wing outer plate together form a part of the aircraft's aerodynamic shape. During the service process of an aircraft, the fuel tank cover is inevitably hit by foreign objects, ensuring the impact resistance of the fuel tank cover is of great significance for ensuring the safety of the aircraft. In this paper the research progress of impact resistance performance of wing fuel tank cover is systematically introduced from three aspects: airworthiness regulations requirements, common materials and structural forms, assessment methods and evaluation, the current research conclusions are summarized, and the future development of wing fuel tank cover is prospected. The research results can provide theoretical and technical references for the design and manufacturing of new types of masks in the future.

**Key words:** wing fuel tank cover; airworthiness regulations; impact resistance; research progress

收稿日期: 2022-09-04; 修回日期: 2023-05-26

通信作者: 蔡玄龙, caixuanlong1991@163.com

引用格式: 蔡玄龙, 彭国辉, 张兆峰, 等. 机翼油箱口盖的抗冲击性能研究进展[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 29-36.

CAI Xuanlong, PENG Guohui, ZHANG Zhaofeng, et al. Research progress on impact resistance wing fuel tank cover[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 29-36. (in Chinese)

## 0 引言

民用飞机的机翼燃油一般布置在机翼的主盒段内,为方便后期对机翼进行维修,需要在机翼的下表面设置检修口为翼盒提供维护和装配的通道,并在检修口处布置油箱口盖<sup>[1-2]</sup>,口盖与周围的机翼外板共同构成飞机气动外形的一部分。

飞机在服役过程中,由于使用环境的特殊性,油箱口盖无法避免地会遭受外物的撞击。一旦口盖发生损坏,会引起内部燃油的泄露,当燃油泄漏量达到引起火灾的量级时,就会导致油箱发生爆炸。因此作为飞机结构的一个重要组成部分,机翼油箱口盖的抗冲击性能将直接影响飞机整体的安全性。

在飞机服役过程中,油箱口盖受到的异物冲击主要分为两类:第一类是低能量发动机碎片。尽管飞机的航空发动机和辅助动力单元在设法降低使用过程中出现非包容性破坏的概率,但到目前为止,仍然会出现高速运动转子碎片飞出的情况<sup>[3-4]</sup>;第二类是破碎的轮胎碎片。航空轮胎作为飞机所有部件中唯一与地面接触的一个,它内部有高达 18 个大气压的高压气体,同时需要承受飞机的自重、起飞降落过程中巨大的惯性冲击力和其与地面的摩擦力。一旦轮胎受损,脱落的轮胎碎片会高速冲击周围的结构<sup>[5]</sup>。

本文针对机翼油箱口盖的研究现状进行梳理,从油箱口盖的适航法规要求、常用材料和结构形式、考核方法与评价 3 个方面进行系统地分析和总结,以期后续新型口盖的设计和制造提供一定的理论和技术参考。

## 1 适航法规要求

为保障飞机的安全性,目前国际上主要的适航条款均对机翼油箱口盖的抗冲击适航性能提出了要求,其中包括中国民用航空局(CAAC)的中国民用航空规章(CCAR)、美国联邦航空管理局(FAA)的联邦航空规章(FAR)和欧洲航空安全局(EASA)的合格审定规范(CS)。

### 1.1 CCAR 规范

CCAR25 部<sup>[6]</sup>中的 AC25.963e-1 条款中有两项要求:“(1)油箱口盖必须满足下述准则,以防止

燃油的流失量达到危险程度;(2)位于经验或分析表明很可能遭受撞击的区域内的所有口盖,必须通过分析或试验表明,其遭受轮胎碎块、低能量发动机碎块或者其他可能的碎片打穿或造成变形的程度已降到最低。”

### 1.2 FAR 规范

FAR25<sup>[7]</sup>中关于油箱口盖抗冲击性能的要求与 CCAR25 中的内容相同。另有两个通告 AC20-128A、AC25.963-1 对冲击状态进行了补充。

发动机可能产生的碎块分为单个 1/3 转子碎块、中间碎块、风扇叶片碎块和内部小碎块,各类碎块的飞出范围如图 1 所示,并同时规定了各类碎块的尺寸。

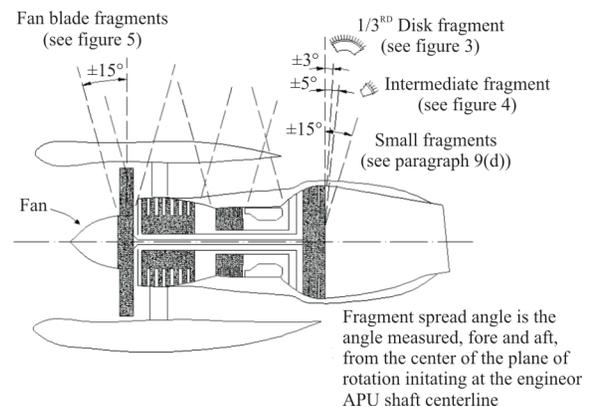


图 1 FAR 文件中定义的碎块飞出范围<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Fly-out range of fragments defined in the FAR file<sup>[7]</sup>

轮胎碎块的影响范围为:以常规液压支撑杆连接的轮胎旋转中心为基点,与轮胎旋转平面成 30° 的内外侧区域。冲击试验中使用的碎块为轮胎胎面段,重量为轮胎总重量的 1%,冲击速度为飞机轮胎的旋转速度,冲击面积为 1.5% 的胎面面积。

### 1.3 CS 规范

CS25<sup>[8]</sup>中详细规定了发动机碎块和轮胎碎块的外形、材质、重量、冲击角度和冲击速度,以及口盖冲击后合格判定的标准。

AMC 25.963(e)中对发动机碎块的冲击试验做出规定。试验碎块使用钢制实心立方体模拟,边长为 9.5 mm (3/8 in),冲击速度为 213.4 m/s (700 ft/s);碎块的冲击影响需要考虑两个区域,区域范围如图 2 所示;同时还给出了相关试验指导性

材料和冲击后合格判定标准。

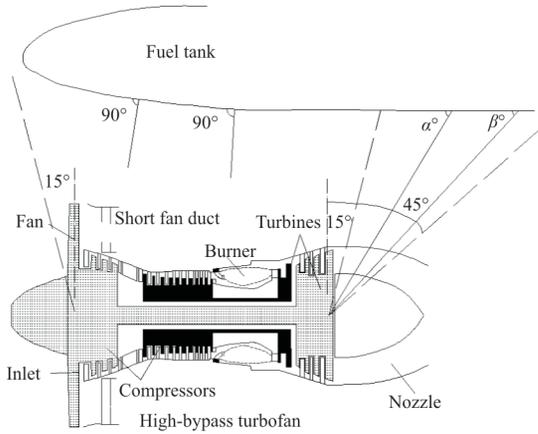


图 2 CS 文件中定义的碎块飞出范围<sup>[8]</sup>

Fig. 2 Fly-out range of fragments defined in the CS file<sup>[8]</sup>

AMC 25.734 中对不同类型的轮胎碎块模型进行了详细定义,碎块类型包括轮胎碎块威胁模型、轮毂碎块威胁模型、脱落的轮胎条威胁模型、胎压破坏碎块威胁模型,并分别规定了碎块的尺寸等参数。

### 1.4 适航法规的对比

对比上述适航条例的要求,CCAR 条款仅对油箱口盖的抗冲击性能提出了一个定性的指标,但轮胎碎块和低能量发动机碎块的外形、材质、重量、冲击角度和冲击速度,以及口盖冲击后合格判定的标准都缺乏详细的技术指标,无法用于后续的适航验证和审定。FAR 条款和 CS 条款对发动机碎块和轮胎碎块的参数均进行了定义。三种规范的对比如表 1 所示。

表 1 不同规范的对比

Table 1 Comparison of different specifications

适航规范	发动机碎块	轮胎碎块	可操作性
CCAR	无详细试验参数	无详细试验参数	差
FAR	碎块模型分为 4 种,与发动机叶片尺寸等相关	碎块模型与轮胎尺寸等相关	好
CS	碎块模型具有唯一性	碎块模型分为 4 种,与轮胎尺寸等相关	好

## 2 常用材料和结构形式

### 2.1 常用材料

由于使用环境的特殊性,机翼油箱口盖的材

料需要同时具有良好的抗冲击性能、一定的强度和刚度,以及防火能力等。其中使用范围最广的材料是铝合金和钛合金,作为飞机常用的金属材料,美国联邦航空管理局曾对其力学性能进行了详细研究<sup>[9-14]</sup>,为口盖设计提供了支撑。铝合金材料根据制造工艺可分为机加工和精密铸造等方式,通过对比研究<sup>[15-16]</sup>,发现机加工制造的口盖具有更好的抗冲击性能。此外,具有高强度、高模量的复合材料也正被逐步应用于机翼油箱口盖等抗冲击结构中<sup>[17-20]</sup>,包括碳纤维增强树脂和碳纤维增强聚醚醚酮(CF/PEEK)等。

目前飞机对材料性能的要求在不断提升,轻质、性能优良的复合材料将被更广泛地应用于飞机结构中,预计复合材料将成为油箱口盖的主流材料。

### 2.2 常用结构形式

目前油箱口盖主要有 3 种结构形式,分别是单层口盖、双层口盖和夹心口盖,3 种结构形式口盖的剖面图如图 3 所示。

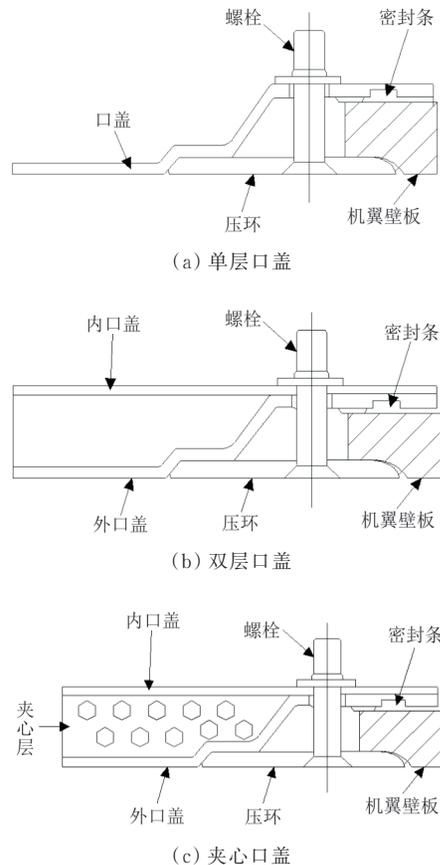


图 3 油箱口盖结构<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Oil tank cover structure<sup>[17]</sup>

单层口盖的结构和制造工艺简单,但抗冲击能力较弱,若冲击物击穿口盖,容易造成燃油泄漏。双层口盖的结构和制造工艺较复杂,但双层式的结构可以抵挡冲击物两次冲击载荷,降低冲击物对其后面板的破坏,达到提高整体结构抗冲击性能的目的<sup>[21]</sup>,只要第二层面板未发生破坏,就可以保证结构的完整性,燃油不会发生泄露。夹心口盖的结构和制造工艺复杂,它由上下两层强度和模量较高的金属面板或纤维面板及中心夹层复合而成,中心夹层可以是点阵结构,也可以是泡沫等轻质结构。夹层结构抗弯刚度高、重量轻,中心的夹层可以提供较强的缓冲和吸能作用,从而大幅度提高结构的抗冲击性能<sup>[22-25]</sup>。3种结构形式口盖的性能对比如表2所示。

表2 不同结构形式口盖性能对比  
Table 2 Performance comparison of different structural forms of cover

口盖结构形式	结构和工艺性	抗冲击性能
单层口盖	简单	弱
双层口盖	一般	中
夹心口盖	复杂	强

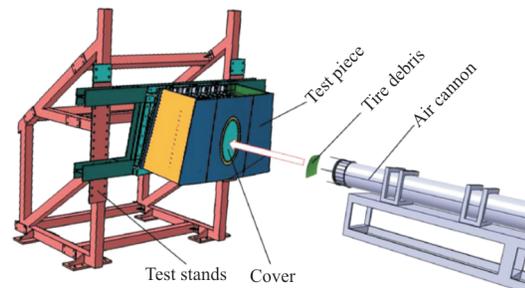
Wang Fusheng等<sup>[18]</sup>对单层口盖和双层口盖的性能进行了对比,发现使用双层结构可以显著提高口盖的抗冲击性能。还有一些研究人员对双层或夹心结构的抗冲击性能进行了研究,其中张锋等<sup>[22]</sup>发现相比于常见的单层加筋板式结构,在波纹夹层结构内部填充泡沫后能够减小结构在受到冲击时的变形,显著提高结构的吸能性能;Tang E等<sup>[23]</sup>研究了冲击速度和弹丸密度对玻璃钢/泡沫铝夹层板破坏形式的影响,发现当泡沫铝与高强度的板材结合形成夹心结构后,可以大幅提高结构的抗冲击性能;王显会等<sup>[24]</sup>对车辆底部的防护蜂窝夹层结构的抗冲击性能进行了研究,发现双层蜂窝结构具有更好的抗冲击性能,压缩变形量更大,可以吸收更多的能量。相关研究表明,在不考虑工艺复杂性的前提下,双层或夹心结构拥有更好的抗冲击性能。近些年,复合材料的制造工艺技术得到了提高,极大程度上减少了制造成本和制造时间,预计后续油箱口盖会更多地采用夹心结构或者多层复合结构。

### 3 考核方法与评价

油箱口盖抗冲击性能的考核方法主要分为两种:实物试验和有限元仿真模拟。油箱口盖作为飞机结构的组成部件,其最重要的作用是保证在受到冲击后内部燃油不泄露或者燃油的泄露量不达到危险的程度。在评价口盖的抗冲击性能时,主要观察和测量口盖在受到冲击后的破坏程度,包括面板的变形程度、结构的损伤程度、冲击过程产生的应力值等,来判断口盖是否满足抗冲击性能的要求。

#### 3.1 试验研究

试验主要依据适航法规的要求进行,典型的试验装置如图4所示。实物试验主要考核口盖的破坏程度与冲击物的姿态、撞击位置和内部燃油体积<sup>[25]</sup>的关系。



(a) 冲击装置三维模型



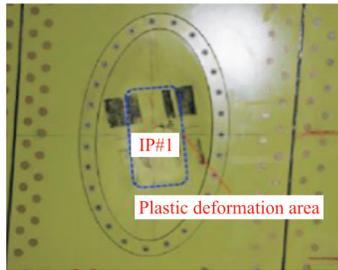
(b) 实物装置图

图4 冲击装置示意图<sup>[25]</sup>

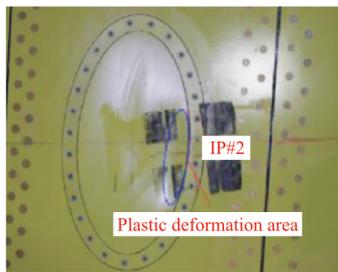
Fig. 4 Impact device schematic diagram<sup>[25]</sup>

Wang Peiyan等<sup>[25]</sup>通过研究轮胎碎块冲击整个机翼油箱的过程,同样发现口盖中心区域的塑性变形范围要大于刚度较大的压环附近区域,但

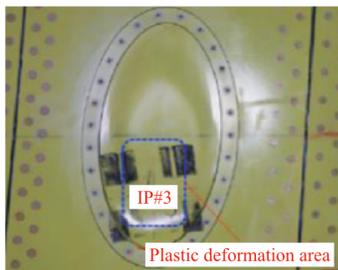
从碎块动能和外侧面板的塑性变形值分析,第二个冲击点也处于危险状态,如图 5 所示。



(a) 冲击点 1



(a) 冲击点 2



(a) 冲击点 3

图 5 不同冲击位置试验结果<sup>[25]</sup>

Fig. 5 Test results of different impact positions<sup>[25]</sup>

T. De Vuyst 等<sup>[26]</sup>和孔令勇等<sup>[27]</sup>使用不同姿态的立方体冲击油箱口盖,发现边接触状态下口盖的破坏程度大于面接触和角点接触,如图 6 所示。

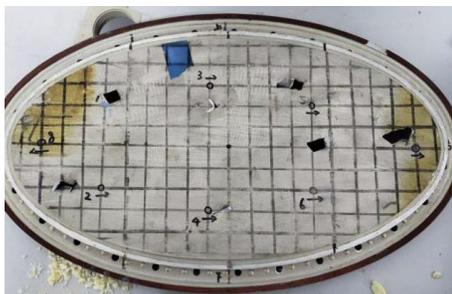


图 6 低能量发动机碎片冲击试验结果<sup>[27]</sup>

Fig. 6 Low energy engine debris impact test result<sup>[27]</sup>

张元卿等<sup>[15]</sup>使用轮胎碎片对油箱口盖进行了冲击试验,发现不同撞击部位的变形量虽然不同,但撞击产生的最大等效应力基本相当,认为后续可通过考核撞击中心的破坏程度来评价口盖整体的抗冲击性能。因此,在适航性认证中需要同时考虑两个冲击点的动态响应。此外,还发现了燃料体积越高,油箱口盖内侧面板的塑性变形越大,在适航性认证中建议采用全燃料的状态进行试验。

### 3.2 仿真研究

为准确评价油箱口盖的抗冲击性能,国内外研究者们使用数值模拟方法对口盖的抗冲击性能进行了研究,并取得了相应的研究成果。仿真计算方法操作简单,可方便调整试验的参数,同时不受客观条件的限制,可以很好地考核口盖的抗冲击性能。但可靠的仿真分析方法的建立,需要准确的材料模型参数,在油箱口盖的冲击计算中,轮胎碎块的材料模型和口盖的复合材料模型最为复杂。

为获取轮胎碎块的参数,R. A. W. Mines 等<sup>[28-29]</sup>使用试验和仿真的方法研究了“协和”超声速飞机轮胎的碎块,分析发现 LS-DYNA 中的离散模型可以很好地模拟轮胎材料。在计算模型中,轮胎碎片中的橡胶部分采用 Mooney-Rivlin 材料模型模拟,轮胎碎片中的增强部分采用 Cable 材料模型模拟,仿真分析结果与试验结果吻合良好。R. S. Birch 等<sup>[30]</sup>、A. A. Ryabov 等<sup>[31]</sup>、Yao Shile 等<sup>[16]</sup>等使用有限元软件 LS-DYNA 进行仿真研究,依据试验得到的碎块参数,分别利用 Mooney-Rivlin、Ogden-Rubber、SIMPLIFIED RUBBER 材料模型模拟轮胎碎片,与试验结果具有良好的吻合性。同时,油箱口盖使用的复合材料的失效模型会极大地影响仿真结果的精确性。王富生等<sup>[18-19]</sup>使用有限元软件 LS-DYNA 中的 Chang-Chang 失效准则对口盖中碳纤维板的冲击损伤区域进行刚度退化处理;A. F. Johnson 等<sup>[17]</sup>使用动力学分析软件 PAM-CRASH 中的退化两相材料模型模拟 CF/PEEK 的子层板,均取得了与试验吻合性较好的结果。此外,为提高计算效率,A. Johnson 等<sup>[32]</sup>使用 PAM-CRASH 建立了 2.5D 有限元计算模型,并通过与相关试验结果对比,发现可在

缩短计算时间的同时获得较好的计算结果。

为进一步研究冲击位置、燃油体积等因素对油箱口盖冲击响应的影响。Wang Fusheng等<sup>[18]</sup>通过计算表明了口盖的损伤程度与冲击速度、冲击角度之间的关系,同时还发现不同结构形式的口盖在橡胶弹体作用下破坏临界速度的差值大于钛合金弹体,计算模型如图7所示。

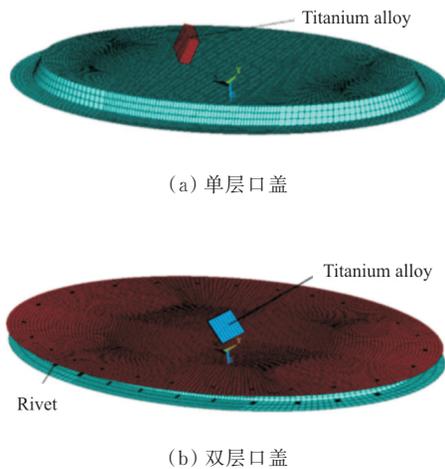


图7 碎片冲击口盖的有限元模型<sup>[18]</sup>

Fig. 7 Finite element model of fragment impact cover<sup>[18]</sup>

张元卿等<sup>[15]</sup>通过对轮胎碎片冲击油箱口盖中心和压环连接区域两种情况的计算,发现两种工况下产生的最大形变位移和等效塑性应变相差较大,但冲击过程中结构的最大等效应变基本相同,且两者结构变形吸收的轮胎碎片的能量基本相同。此外,Wang Peiyan等<sup>[25]</sup>通过建立仿真模型(如图8所示),将计算得到的口盖内侧区域的塑性应变值与试验结果对比,发现具有良好的 consistency,并通过对油箱晃动、燃油压力和塑性应变的计算,进一步研究了燃油量的体积和冲击位置对油箱口盖安全性的影响。

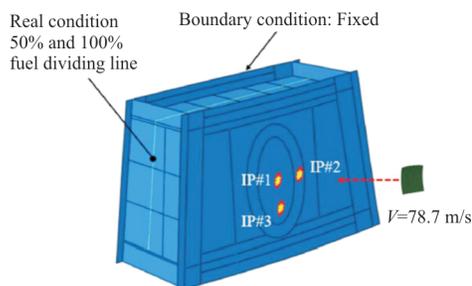


图8 有限元计算模型<sup>[25]</sup>

Fig. 8 Finite element calculation model<sup>[25]</sup>

关于油箱口盖实物目前开展的相关试验较少,得到的结论也相对有限。但在仿真分析上,建立了一种油箱口盖抗冲击性能的仿真评价方法,包括材料模型参数的获取、材料失效模型的选择、有限元模型的建立以及破坏程度的考核等内容,可以为后续的研究提供参考。还有诸多研究人员开展了相关材料和结构冲击响应的研究<sup>[33-36]</sup>,可供后续设计参考。

实物试验是最直观体现抗冲击性能的考核方式,在研究前期,当对结构的抗冲击性能和破坏机理尚不清楚时,研究者还是需要通过一定数量的试验,研究结构和材料的各个参数与抗冲击性能的关系。但重复性冲击试验需要巨大的时间成本和经济成本,为提高研究效率,可使用有限元软件对油箱口盖的抗冲击性能进行计算,仿真计算的结果通常会与实际存在一定偏差,但计算结果的趋势性有一定的指导意义。因此,将实物试验与有限元仿真模拟相结合的研究方法是目前考核油箱口盖的一种有效方式。

## 4 总结与展望

综上所述,已有的研究工作通过试验和有限元分析方法对油箱口盖在低能量发动机碎片和轮胎碎片冲击下的损伤与适航特性进行了研究,在验证油箱口盖产品抗冲击性能的过程中,取得了相关研究成果:

- 1) 通过试验和仿真研究,发现油箱口盖在不同冲击姿态下的损伤不同,其中边撞击时口盖的破坏最为严重;
- 2) 不同的冲击位置下口盖的损伤不同,需要同时考核多个位置的抗冲击性能;
- 3) 油箱内的燃油体积会对口盖的抗冲击性能产生影响,建议后续适航性认证中采用全燃料状态进行试验;
- 4) 油箱口盖的损伤程度同时与冲击速度、冲击角度相关,且不同结构形式的油箱口盖在橡胶弹体作用下破坏临界速度的差值大于钛合金弹体。

然而,针对油箱口盖抗冲击性能的研究,仍有如下问题需要解决:

- 1) 试验研究相对较少,未能覆盖到适航法规要求的工况;
- 2) 考虑到仿真计算中选用的材料模型和计算

方法对油箱口盖抗冲击性能的评估会产生较大的影响,建议专家学者后续编制行业内通用的仿真计算指导书,以期更好地定量评估油箱口盖的抗冲击性能。

目前根据相关研究,已经获得了满足适航法规要求的油箱口盖产品。但如果需要在满足抗冲击性能的要求下,进一步实现轻量化,仍面临诸多问题。近些年新材料和新结构均取得了巨大的进步,例如高性能纤维混合织物、负泊松比蜂窝结构等<sup>[37-39]</sup>均在抗冲击领域获得了应用,为后续油箱口盖产品的轻量化设计提供了参考。

### 参考文献

- [1] 飞机设计手册总编委会. 飞机设计手册: 第5册——民用飞机总体设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000: 230-237.  
General Editorial Board of *Aircraft Design Manual*. Aircraft design manual: Vol. 5—general design of civil aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000: 230-237. (in Chinese)
- [2] 张陈力子. 飞机口盖设计与布置要求研究[J]. 科学视界, 2017(1): 184.  
ZHANG Chenlizi. Study on design and layout requirements of aircraft cover[J]. Science and Technology Vision, 2017(1): 184. (in Chinese)
- [3] 陈志达. 民航客机发动机转子非包容性损坏分析[J]. 航空制造技术, 2011(13): 75-79.  
CHEN Zhida. Analysis of uncontained engine rotor events for civil airplane[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(13): 75-79. (in Chinese)
- [4] 李雪姣, 付仁合. 航空发动机非包容性碎片的危害评估方法研究[J]. 装备制造技术, 2011(2): 21-23.  
LI Xuejiao, FU Renhe. The research on the assessment of uncontained debris hazard [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(2): 21-23. (in Chinese)
- [5] HEFNY A F, EID H O, AL-BASHIR M, et al. Blast injuries of large tyres: case series[J]. International Journal of Surgery, 2010, 8(2): 151-154.
- [6] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.  
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [7] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards: transport category airplanes: 14 CFR Part 25[S]. Washington: FAA, 2009.
- [8] EASA. Amending decision on certification specifications for large aeroplanes: CS-25[S]. Cologne: EASA, 2013.
- [9] LESUER D R. Experimental investigation of material models for Ti 6Al-4V and Al 2024T3: DOT/FAA/AR-00/25 [R]. US: FAA, 2000.
- [10] GOGOLEWSKI R P, MORGAN B R. Ballistics experiments with titanium and aluminum targets: DOT/FAA/AR-01/21[R]. US: FAA, 2001.
- [11] KAY G. Failure modeling of titanium 6Al-4V and aluminum 2024-T3 with the Johnson-Cook material model: DOT/FAA/AR-03/57[R]. US: FAA, 2003.
- [12] KELLY S, JOHNSON G. Statistical testing of aircraft materials for transport airplane rotor burst fragment shielding: DOT/FAA/AR-06/9[R]. US: FAA, 2006.
- [13] BUYUK M, LOIKKANEN M, KAN C D. Explicit finite element analysis of 2024-T3/T351 aluminum material under impact loading for airplane engine containment and fragment shielding: DOT/FAA/AR-08/36[R]. US: FAA, 2008.
- [14] KAY G, GOTO D, COUCH R. Statistical testing and material model characterisation of aluminum and titanium for transport airplane rotor burst fragment shielding: DOT/FAA/AR-07/26[R]. US: FAA, 2007.
- [15] 张元卿, 张仲桢. 民机燃油箱口盖耐轮胎碎片撞击分析及试验[J]. 飞机设计, 2013, 33(5): 35-38.  
ZHANG Yuanqing, ZHANG Zhongzhen. Civilian aircraft fuel tank access covers impact resistance by failed tire fragments characteristic analysis and test [J]. Aircraft Design, 2013, 33(5): 35-38. (in Chinese)
- [16] YAO Shile, YUE Zhufeng, GENG Xiaoliang, et al. Safety assessment of aircraft fuel tank access cover under the impact load by tire fragments[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(1): 228-239.
- [17] JOHNSON A F, KEMPE G, SIMON J. Design of composite wing access cover under impact loads [J]. Applied Composite Materials, 2000, 7(4): 219-229.
- [18] WANG Fusheng, JIA Senqing, WANG Yi, et al. Impact response study on covering cap of aircraft big-size integral fuel tank [J]. Applied Composite Materials, 2016, 23(5): 953-972.
- [19] 陈汉, 王富生, 贾森清, 等. 含冲击损伤复合材料油箱口盖剩余强度研究[J]. 强度与环境, 2018, 45(3): 30-38.  
CHEN Han, WANG Fusheng, JIA Senqing, et al. Study on the residual strength of composite fuel tank cover with damage after impact [J]. Structure and Environment Engineering, 2018, 45(3): 30-38. (in Chinese)
- [20] 顾善群, 刘燕峰, 李军, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料高速冲击性能[J]. 材料工程, 2019, 47(8): 110-117.  
GU Shanqun, LIU Yanfeng, LI Jun, et al. High speed impact properties of carbon fiber/epoxy resin composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(8): 110-117. (in Chinese)
- [21] 祝家奇. 双层铝合金板的抗冲击特性研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019.  
ZHU Jiaqi. Research on the resistance performance of double aluminum alloy target [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019. (in Chinese)
- [22] 张锋, 王维民, 潘晋, 等. 波纹夹层吸能结构冲击响应试验研究[J/OL]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.u.20211004.2058.016.html>.  
ZHANG Feng, WANG Weimin, PAN Jin, et al. Experi-

- mental study on the impact response of corrugated sandwich structure under lateral impact [J/OL]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.u.20211004.2058.016.html>. (in Chinese)
- [23] TANG E, ZHANG X, HAN Y. Experimental research on damage characteristics of CFRP/aluminum foam sandwich structure subjected to high velocity impact [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 4620-4630.
- [24] 王显会, 师晨光, 周云波, 等. 车辆底部防护蜂窝夹层结构抗冲击性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(11): 1122-1126.  
WANG Xianhui, SHI Chenguang, ZHOU Yunbo, et al. Impact resistance analysis of honeycomb sandwich structure for the vehicle bottom protection[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(11): 1122-1126. (in Chinese)
- [25] WANG Peiyan, LIAN Chenchen, YUE Chunxia, et al. Experimental and numerical study of tire debris impact on fuel tank cover based on coupled Eulerian-Lagrangian method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 157(4): 103968.
- [26] DE VUYST T, VIGNIEVIC R, AZORIN A A, et al. A study of the effect of projectile orientation on the results of ballistic impact tests as described in the EASA CS-25 regulations for fuel tank access covers[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part G): Journal of Aerospace Engineering, 2016, 231(11): 1970-1978.
- [27] 孔令勇, 陆佳南, 吴志斌. 民用飞机油箱口盖抗低能量发动机碎片冲击适航验证技术研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(9): 173-179.  
KONG Lingyong, LU Jianan, WU Zhibin. Airworthiness certification technology on civil aircraft fuel tank cover withstanding the engine debris[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(9): 173-179. (in Chinese)
- [28] MINES R A W, MCKOWN S, BIRCH R S. Impact of aircraft rubber tyre fragments on aluminium alloy plates: I — experimental [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(4): 627-646.
- [29] KARAGIOZOVA D, MINES R A W. Impact of aircraft rubber tyre fragments on aluminium alloy plates: II — numerical simulation using LS-DYNA [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(4): 647-667.
- [30] BIRCH R S, BERGLER C, KRACHT M, et al. Post-test simulation of airliner wing access panel subject to tyre debris impact [C] // 5th European LS-DYNA Users Conference. UK: [s. n.], 2005: 1-15.
- [31] RYABOV A A, ROMANOV V I, KUKANOV S S, et al. Numerical simulation of elastic-plastic deformation of aircraft fuel tank access cover impacted by tyre fragment [C] // 9th European LS-DYNA Users Conference. Solihull, UK: [s. n.], 2013: 25-31.
- [32] JOHNSON A, TOSO-PENTECÔTE N, SCHWINN D. Modelling damage in composite aircraft panels under tyre rubber impact [C] // 17th International Conference on Composite Materials. UK: [s. n.], 2009: 1135-1145.
- [33] 陈博. PVC 泡沫夹芯碳纤维/环氧树脂夹芯板低速冲击数值模拟[D]. 太原: 中北大学, 2016.  
CHEN Bo. PVC foam sandwich of carbon fiber/epoxy sandwich panel of low velocity impact numerical simulation [D]. Taiyuan: North University of China, 2016. (in Chinese)
- [34] PAEIRA J M, REVHOCK D M. Explicit finite element modeling of multilayer composite fabric for gas turbine engine containment systems: PB2005-102471 [R]. US: FAA, 2004.
- [35] GOWER H L, CRONIN D S, PLUMTREE A. Ballistic impact response of laminated composite panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(9): 1000-1008.
- [36] 孙文龙. 基于耐撞性的碳纤维/聚丙烯夹层板结构优化及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
SUN Wenlong. Structural optimization and application of carbon fiber/polypropylene sandwich panels based on crashworthiness [D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [37] 易凯, 孙建波, 杨志勇, 等. 混杂纤维复合材料层板的抗弹冲击性能[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(1): 82-85.  
YI Kai, SUN Jianbo, YANG Zhiyong, et al. Ballistic impact resistance of hybrid composite materials [J]. Aerospace Materials and Technology, 2019, 49(1): 82-85. (in Chinese)
- [38] 陈战辉, 万小鹏, 黄文博, 等. 混杂与非混杂层板弹丸冲击试验研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(5): 803-808.  
CHEN Zhanhui, WAN Xiaopeng, HUANG Wenbo, et al. Experimental investigation of bullet impact damage of hybrid and non-hybrid laminates [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(5): 803-808. (in Chinese)
- [39] LI T T, WANG R, LOU C W, et al. Static and dynamic puncture behaviors of compound fabrics with recycled high-performance Kevlar fibers [J]. Composites: Part B, 2014, 59: 60-66.

#### 作者简介:

蔡玄龙(1991—),男,硕士,工程师。主要研究方向:复合材料结构设计。

彭国辉(1987—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:复合材料机翼设计。

张兆峰(1979—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:环氧树脂基复合材料的设计与应用。

李小慧(1973—),男,硕士,教授级高级工程师。主要研究方向:高分子及复合材料产品的设计与应用。

康亦杰(1995—),男,硕士,工程师。主要研究方向:复合材料机翼设计。

(编辑:马文静)