



# 航空飞机风挡玻璃防弹性能的设计研究

徐世勇（江苏铁锚科技股份有限公司）

**摘要：**航空飞机风挡玻璃安装于飞机座舱前方，主要为飞行员提供清晰的外部视野，承受气动及座舱增压载荷，保护驾驶员免受气流吹袭，具备防弹性能。对飞机风挡玻璃提出防弹要求在国内应用较少，根据目前国内外防弹玻璃主流设计技术，采用双层透明材料通过胶合层层合的设计方式，实现防弹要求。对比分析了各类风挡玻璃设计应用透明材料，确定主体结构采用有机玻璃（外层）+中间胶合层+聚碳酸酯材料（内层）复合的层合结构，并通过仿真分析及试验验证确定了设计的可行性。

**关键词：**飞机风挡；结构设计；防弹性能；有机材料

## 1 引言

国内较少对航空飞机风挡玻璃提出防弹要求，调研了目前国内外防弹玻璃设计技术现状，具有防弹功能的有机层合风挡在美国 F-15、F-16、F-18、F-35 等飞机上已应用很成熟，为实现透明件防弹要求，多是采用双层或多层透明材料通过胶合层层合的设计方案。

而在国内飞机上应用尚属空白，无论在结构设计技术还是工艺技术均不够成熟，有许多关键技术亟待解决。

实现具有防弹功能的飞机风挡结构设计，主要取决于选择的内层（背弹面）材料能否在外层材料破裂的情况下承受子弹的侵彻以及层合结构单层材料的厚度和整体结构的厚度。

因此，材料选择具有较高防弹性能的内层（背弹层）材料，与外层和内层材料粘接性良好的中间层材料；在风挡结构设计方面，采用防弹仿真计算与弹击试验相结合的技术手段，确定各层材料的厚度，加强试件的弹击试验摸底，确定最终的层合结构。

## 2 防弹原理性分析

具备防弹性能的飞机风挡玻璃的多层材料层合方案是国内首次提出的设计思路，利用了外层材料受到子弹快速冲击易破碎的特点，结合具有弹性的中间胶合层材料，分散一部分子弹的冲击能量。而内层（背弹层）材料具有优异的抵抗子弹侵彻的能力，可使风挡整体结构具备防弹功能。

## 3 主体材料选择分析

用于透明件的透明结构材料分为无机材料，包括硅酸盐玻璃、透明陶瓷；有机材料，包括浇铸或定向有机玻璃，聚碳酸酯，材料分类及种类见表 1。

上述任何一种单一材料都难以抵御各种类型弹丸的侵彻，需要根据防弹性能要求将各种特性的材料，特别是防弹性能突出的结构材料通过弹性中间层材料将两层或多层粘接组成在一起形成复合结构使用。由于各种材料的特性不同，硅酸盐玻璃和透明陶瓷等无机材料成型工艺性差，虽然透明陶瓷的抗弹性能优异，但其曲面成型工艺难以实现，更

适合做平面型的防弹玻璃。而有机材料因其良好的可成型性，适合成型大曲率外形的透明件。从表 2 各类透明结构材料的综合特性分析可以看出，有机材料是最可能实现曲面风挡外形的材料，而且密度小，透光率高，综合各因素考虑优先选用有机透明结构材料。

### 3.1 外层材料选择

有机透明材料是航空透明件应用最为广泛的材料。目前国内外飞机透明件应用最多的透明有机结构材料主要是航空级浇铸和定向有机玻璃。有机玻璃是聚丙烯酸酯塑料板（Acrylic sheet）的别称<sup>[1]</sup>，由甲基丙烯酸甲酯单体或甲基丙烯酸甲酯和其他改性剂经本体聚合成的板材，经过双轴热拉伸可制成定向板材，大大提高了浇铸有机玻璃的冲击强度、抗裂纹扩展性和抗银纹性能。通过加热成型，有机玻璃可制成单曲率或形状复杂的双曲率、多曲率制件。其中，微交联的有机玻璃板材，是一种耐热性、耐久性优异的材料，其定向板材是美国和欧洲各国飞机透明件使用的主



要结构材料。国内航空有机玻璃经过五十几年的发展历程，已形成了可满足各机型使用要求，具有自主品牌的多品种、多牌号、多尺寸、多厚度规格的系列产品，包括 YB-2、YB-3、YB-M-10 等浇铸板材和 YB-DM-3、YB-DM-11、YB-DM-10 等定向板材，其性能已与国外同类产品性能相当。但有机玻璃的抗弹性能并不突出，即使在与硅酸盐玻璃或透明陶瓷复合的防弹玻璃中，也未有作为内层背板使用的先例。

由于定向有机玻璃成型对温度要求比较苛刻，与内层材料复合时如温度控制不好易热松弛取向使材料变形，考虑到成型工艺性和与内层材料性质匹配，同时希望外层材料面对弹击时能够碎裂分散掉一部分冲击能量，因此选择浇铸有机玻璃（非定向有机玻璃）作为外层材料。

### 3.2 内层材料选择

航空级聚碳酸酯板材（PC）是由双酚-A型聚碳酸酯树脂经过挤出成型制出板材，再经热压抛光而成。聚碳酸酯突出的优点是耐热性较高，热变形温度比有机玻璃高约 30℃；韧性极好，冲击强度比定向有机玻璃高 20 倍以上，但耐磨性较差，对有机溶剂和紫外线敏感，需添加紫外吸收剂，使用时表面需用耐磨涂层保护。经过高温历史的热压抛光聚碳酸酯虽然光学性能有所提高，但冲击性能会有所下降。鉴于 PC 板的不足，一般不单独使用，而是作为层合透明件的承力结构层材料使用，即使单独使用，其表面也会有涂层进行防护。美

表1 透明结构材料分类及品种

类别	材料品种	
	无机透明材料	硅酸盐玻璃
透明陶瓷		钇铝石榴石、镁铝尖晶石、氮氧化铝、蓝宝石
有机透明材料	丙烯酸酯体系	浇铸有机玻璃（包括增塑、轻度交联）、定向有机玻璃
	聚碳酸酯体系	双酚A型聚碳酸酯，聚酯碳酸酯

表2 透明结构材料综合特性比较

特性	无机材料		有机材料	
	硅酸盐玻璃	透明陶瓷	有机玻璃	聚碳酸酯
密度	2.4~2.5	3.5~4.5	1.19	1.20
性质	脆、硬	硬	韧	韧
抗弹性	差	优异	差	单层差，需与其他材料组合使用
透光率	低于有机材料	低于有机材料	优异	略低于有机玻璃
耐磨性	好	好	差	差
耐久性	好	好	较好	差，需有涂层防护
可成型性	差	极差	好	好
可加工性	较差	较差	好	好
材料制造工艺	易	较难	易	易

国比较推崇聚碳酸酯用于航空透明件，其主流机型 F16、F18、F22、F35 等型号都应用过聚碳酸酯，主要是为提高透明件的抗鸟撞能力。国内经过透明件行业内科研人员十几年的努力，已在“十三五”期间研发成功航空级的聚碳酸酯材料和聚碳酸酯透明件制造技术，但目前还未得到广泛应用。航空聚碳酸酯板材冲击强度比有机玻璃优异，材料具有超过 90% 的断裂伸长率特性，拉伸模量比有机玻璃低 1GPa 左右，其在撞击过程中会产生大变形，以充分吸收冲击能量。国内发展的注塑压缩成型技术注塑聚碳酸酯透明件，通过较高的压力使分子结构受到挤压形成致密结构，可一定程度上改善聚碳酸酯的抗弹性能。

聚碳酸酯<sup>[2]</sup>具有与有机玻璃

相当的透光率，密度低于有机玻璃，热性能、力学性能、耐磨性和防弹性能均明显优于航空飞行器使用的定向有机玻璃、聚碳酸酯等有机透明材料，可热弯成型、可机械加工，工艺性良好，制造大曲率透明件可行。聚碳酸酯板材与国内 YB-3 浇铸有机玻璃和 YB-DM-10 定向有机玻璃理化性能、光学性能、力学性能对比见表 3<sup>[3]</sup>。

通过以上数据对比可以看出，聚碳酸酯板材光学性能与有机玻璃相当；抗冲击性能等力学性能高于国内性能最好的 YB-DM-10 定向有机玻璃，耐热温度提高了 30℃，综合性能优异。

### 3.3 中间层粘接材料

有机玻璃与聚碳酸酯板材层合粘接用的胶片材料需要具有一定的强度和弹性，与粘接界面有

表3 聚碳酸酯板材与浇铸和拉伸有机玻璃性能对比

序号	项目	聚碳酸酯板材	YB-3	YB-DM-10	试验方法
1	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	1.20	1.19	1.19	GB/T 1033.1
2	热变形温度/℃	139~142	102~105	118~120	GB/T 1634.1
3	透光率/%	≥91	≥92	≥92	GB/T 2410
4	雾度/%	≤0.5	≤0.5	≤0.8	GB/T 2410
5	冲击强度/(kJ/m <sup>2</sup> )	≥534	≥14.8	≥49.0	GB/T 1043
6	拉伸强度/MPa	≥93	≥86.5	≥92.2	GB/T 1040.2

表4 中间层材料综合评价对比

特性	聚乙烯醇缩丁醛	透明有机硅	丙烯酸酯共聚物	热塑性聚氨酯
强度	较低	低	较低	高
弹性	好	好	好	好
耐温性	低	高	低于有机硅	低于有机硅, 高于丙烯酸酯
温度使用范围	窄	宽	较宽	宽
与有机基材粘接性	差	差	好	好
材料状态	胶膜	灌注料	灌注料	胶膜、灌注料
制造工艺	易	易	易	易
制造成本	较低	较高	较高	较高

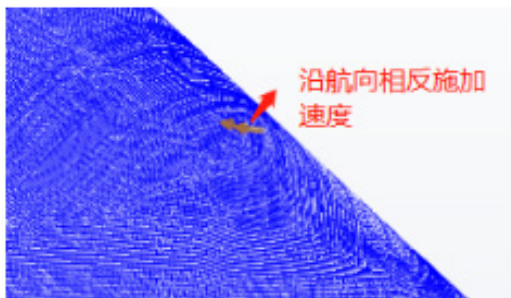


图1 模型的边界条件与加载示意图

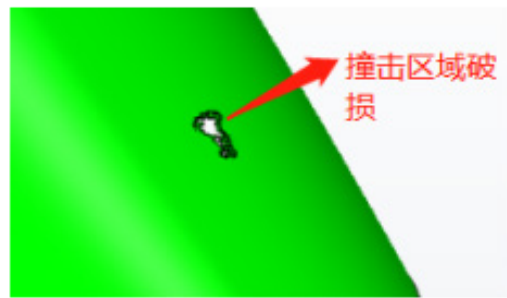


图2 撞击后外层材料效果图

良好的结合力，以起到粘接、分散冲击能量和载荷的作用。以及具备一定抗温差能力、良好光学性能、较低的玻璃化转变温度。

目前可供选择的中间层材料主要有聚乙烯醇缩丁醛(PVB)、有机硅、丙烯酸酯共聚物和热塑性聚氨酯(TPU)。PVB胶片强度较高，与硅酸盐玻璃有很好的粘接力，但其耐热性较低、工作温度范围窄，胶片的强度和模量会随温度急剧变化，而且与有机材料的粘接很差。有机硅中间层材料弹性好、耐温性好，强度较

差，温度使用范围宽，但其致命的弱点就是与有机基材的粘接性差。丙烯酸酯共聚物因有与有机玻璃等透明材料相似的结构，因此与基材的粘接性好，强度可以根据要求进行配方调整，但该材料一般作为灌注料使用，固化周期长，易产生收缩现象。热塑性透明聚氨酯弹性体是在上世纪80年美国开始研发成功的新型中间层材料，其强度介于PVB和有机硅之间，使用温度范围较宽，特别突出的是与基材有良好的粘接性，是适合粘接无机与有机透明

材料理想的中间层材料，而且可以根据需求，对原材料配比进行调整，与应用需求适配性宽泛，既可以以胶膜状态与基材热压使用，也可以以胶液状态灌注至基材之间，后期固化形成整体复合结构。聚氨酯中间层在国内外航空透明件上已广泛使用，使用状态良好。因此可选用聚氨酯胶膜作为中间层材料。中间层材料的综合评价对比见表4。

#### 4 风挡玻璃主体结构设计

本文论述的航空飞机风挡玻璃透明区域主体结构选用高透光

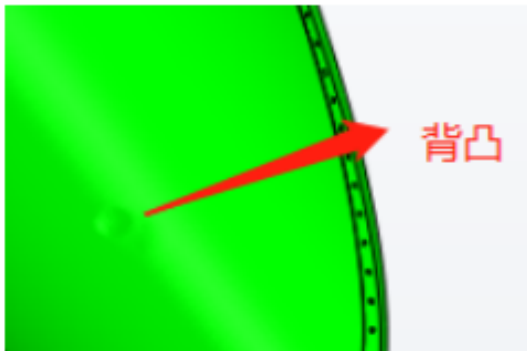


图3 撞击后内层材料效果图

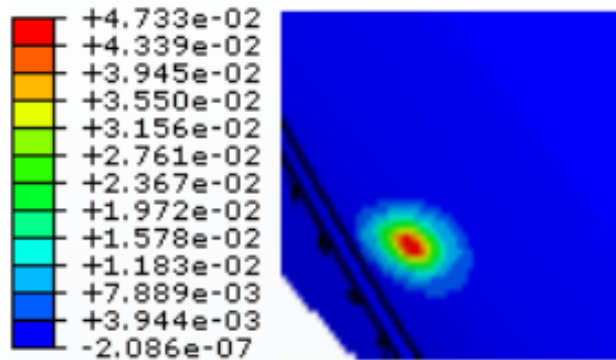


图4 撞击后内层材料应变云图

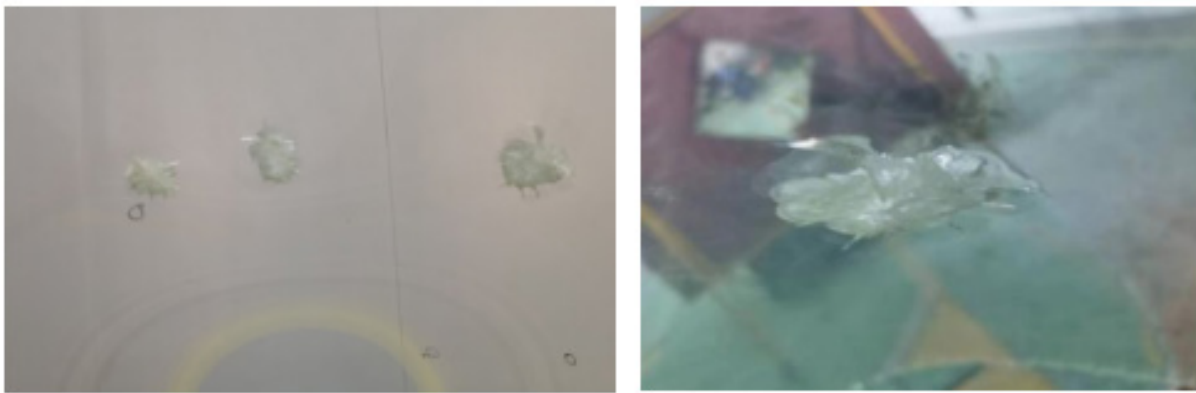


图5 试验件弹击后内表面

率的有机玻璃及聚碳酸酯材料与粘接性能良好的中间层胶合层复合的层合结构,有机玻璃与聚碳酸酯材料透光率均可达到90%以上,且无厚度效应,具有良好的可成形性和与透明中间胶合层的粘接性,可以满足光学性能要求。

层合结构的内层聚碳酸酯材料其特殊的密织交联分子结构,具有有效的防弹效果,选用高模量、高强度的有机玻璃与聚碳酸酯材料进行层合,可使层合结构的风挡具备刚性和防弹等特性,实现强度和防弹功能。

#### 5 防弹性能仿真分析及试验验证

对航空飞机风挡玻璃设计模型及试件级试验件分别进行了仿真分析及试验验证。可采用有限

元分析软件作为防弹验证分析工具,建立有限元模型。使用机体坐标系,风挡玻璃主结构材料采用各向同性的弹塑性本构模型,并设置应变失效。

如图1所示,模型对边框位置单元进行固支约束并在子弹上施加相应的速度。图2为子弹撞击后外层材料效果图,图3为撞击后内层材料效果图,图4为子弹撞击后内层材料的应变云图。

从计算结果可以看出,子弹撞击风挡玻璃后外层有机玻璃材料破损,内层聚碳酸酯材料完好未破损,仅有少量的背凸。撞击处材料最大应变0.047,小于破坏应变0.09。此外,对试件级样件进行了抗弹性能试验,子弹射击后样件未穿透,背面无飞溅物

溅射。

#### 6 结论

通过上述材料选择论述及分析验证,提出的航空飞机风挡玻璃设计具有较高的可行性,能够满足防弹性能,技术优势明显,可作为飞机防弹风挡的参考研究。

#### 参考文献

- [1] 马占鏢. 甲基丙烯酸树脂及其应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [2] 史传琪, 王磊. 先进的透明聚合物材料 [J]. 航空工程与维修, 1999 (2): 19-20.
- [3] 北京航空材料研究院. 航空材料学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.