

美国航空用耐热有机透明材料的使用和研究进展

晨光化工研究院 朱根元

航空有机透明材料，主要用于飞机风挡和座舱盖。它不仅裸露于大气中，而且位于飞机飞行时产生空气动力热的前缘，因而是一项极为重要的大面积非金属材料。随着航空工业的发展，当代的军用战斗机是以高空高速、多用途，短距和垂直起降为特点，原有风挡和座舱材料，已不能满足新的要求。美国空军根据这些特点，认为目前飞机密封座舱盖存在三个主要问题：

1. 耐鸟撞、耐冰雹和耐环境开裂的冲击韧性；

2. 表面耐磨擦；

3. 高温下保持力学性能的耐热性。

在超音速飞行时，尤为突出的是后者。有机透明材料是一种塑料，均系合成高分子化合物，它和其它非金属材料不同的是随温度的升高，性能变化很大，尤其是力学性能下降明显。因此，为了满足高速战斗机的耐热性要求，必须研究和耐高温有机透明材料。顾名思义，这样的材料在高温下除具备足够的强度外，还丝毫不能损失所要求的光学性能；既要有相当大的刚度，又要有很高的韧性；不但应可切削加工、热成型为各种几何外形的制件，又必须能经受各种环境的作用（诸如日光、雨水、温度交变等）。对于一种透明塑料要同时兼备这样全面的性能，技术上确有很大难度。

美国在航空透明材料的研究和使用方面，于世界上是领先的。例如，它首先研究和使用了耐热性优于丙烯酸玻璃的第二代航空有机透明材料聚碳酸酯（PC）；七十年代初已经展

开了“耐热性”堪称第三代的探索研究；1973年2月和1975年11月相继召开了第10次和第11次“航空透明材料会议”；会上分别提出论文约40篇，包括耐热透明材料的研究和开发，大部份为本国各部门的工作；而英国在1964年11月召开第1次会议后迟至1971年6月才召开第2次会议，而且会上提出报告仅十余篇，其中还有四分之一是美国和法国被邀厂商的。为此，本文就以美国在使用和研究耐热航空有机透明材料方面的发展情况述评如下。

（一）

飞机由于超音速飞行，使蒙皮温度升高。温度的升高与大气高度有关。目前超音速飞机，一般均在15000~20000米的大气对流层飞行，这时飞机座舱盖所用的透明材料就必须承受相应的温度：当 M （马赫数） ≤ 2 时，表面温度升至95℃； $M=2.2$ 时，表面温度升至120℃； $M=2.5$ 时升至170℃；当 $M=3.0$ 时，则表面温度将达到250℃。美国自二次大战以来，大力提高战斗机飞行速度，其发展年代示意于图1*，并按飞行速度及其耐温要求，可将已用的有机透明材料相应的划分为四个阶段，见表1。

从表1可以说明，随着飞行速度提高，飞机需要使用相应的耐热有机透明材料。进入七十年代后，苏联首先设计和制造了 $M=2.8\sim 3.0$ 的米格-25、29，这就必需研究和开发表面能承受250~260℃的透明材料。美国空军于1971年就向研制部门提出了这个目标，成为七十年代的基础研究项目。

* 笔者根据参考文献〔2〕等所载资料作图示意。

表1 不同速度飞机使用的相应透明材料

阶段	时 期	M 数	耐温要求 °C	使用的透明材料		机 种 示 例
				美 国 牌 号	相当于苏联牌号	
一	1952年前	< 1	<95	Plexiglass I	CO-95	U-2、P2V、F-86、RF-101
二	1958年前	≤ 2	95	Plexiglass II	CO-120	F-102
三	1962年前后	2.2	120	Plexiglass 55	CO-120或 CO-140	F-104、F-105、F-4、F-106
四	1969年前后	2.5	170	PC		F-111、F-15

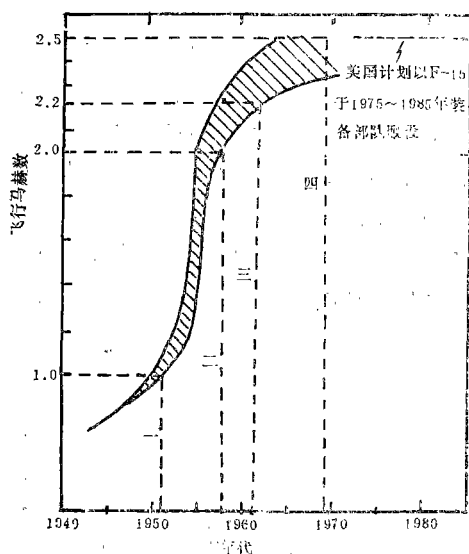


图1 美国提高战斗机飞行速度的发展年代示意

(二)

美国称为Plexiglass的浇注型丙烯酸玻璃,自四十年代后开始用于飞机座舱盖和风挡。如牌号为Plexiglass I、II,已为人们熟知,于此不再赘述。

为了满足五十年代发展M 2.0~2.2机种的要求,美国罗姆-哈斯公司(Rohm & Haas Co.)、杜邦公司(Du Pont)、斯瑞森公司(Sierracin Inc.)、匹兹堡平板玻璃公司(PPG Inc.)、通用安尼林公司(General

Aniline Inc.)等很早就研制耐热有机玻璃。他们先后研制选材的有:

1. 丙烯酸酯类 如 α -氟代丙烯酸甲酯、 α -氯代丙烯酸甲酯(牌号为Gafite)、5106 XP、Polymer K、Lucite 212、Selectron 44、Selectron 400、Sierracin 611、RC-500和Plexiglass 55;

2. 聚酯类 如热变形温度为280~325°F的Sierracin 880、890;

3. 烯丙基类树脂 如CR-39;

事实表明,最后于五十年代初获得定型生产并装机使用的是Rohm&Haas公司的轻度交联共聚丙烯酸玻璃——Plexiglass 55。它有浇注型(MIL-P-8184)和定向拉伸板(MIL-P-25690)两种。它的耐热性高,全面性能优异。例如3.2毫米样品在美国的Albuquerque户外曝晒17年8个月,玻璃化温度仅下降4℃、透光度下降3%;而苏联的CT-1牌号(现为CO-120)航空有机玻璃经大气老化2.5年后,软化温度下降10℃,透光度下降1%。因而尽管Plexiglass 55已问世20余年,仍不失为目前航空有机透明材料的支柱,取代了原有品种Plexiglass I、II,广泛用于F-4、F-105、F-106等超音速战斗机的座舱盖以及F-4、F-5、F-14、F-111和波音747、C-123等很多军用民用飞机的风挡承力结构层。另据报导,航空上使用的有机玻璃尚有Plexiglass 1875、Swedcast

可能由于化学结构的本质问题,对于丙烯酸酯透明塑料来说,要达到高于 $M>2.2\sim 2.3$ 的耐热要求,同时满足全面性能指标,这在技术上有极大困难。因此,从Plexiglass 55之后长达20余年,尚未再出现较之更高耐热、更好性能的这类产品,而继之发展的是另一类航空透明材料——聚碳酸酯。

PC作为耐热航空透明材料,其初期研究可追溯至1959年。当时认为它的冲击韧性非凡,耐热性令人注目,但作为航空用光学板材尚困难。事隔十年后报告了用于飞机透明件的研究工作,并制成座舱盖在F-4上通过了 $M=2$ 的飞行试验。此后,报导愈来愈多,这表明在美国已经解决了PC在性能上的某些不足(如树脂素质、板材耐擦伤,耐气候老化等)和技术上的某些关键(如大面积平板的挤出、压力抛光、表面防护涂层等),从而取得了一定的工程效果。尽管目前还不完美,但不能不说这是航空有机透明材料的一个历史性发展。因此现在美国的PC作为航空透明材料已取得实用价值,并且如Plexiglass一样,作为民用窗玻璃和安全玻璃,已有很大市场。例如PC作为玻璃用途,在1971年占总使用量的11.5%,而1975年则增加至35%,使用数量高达1.4万吨。

PC所以能发展为新一代的材料,主要因为耐热性高,冲击强度优异,这都是丙烯酸玻璃所不及的。

1. 耐热性高 PC的耐热性远比丙烯酸玻璃高,见表2。尤其是升高温度后的拉伸强度明显高于丙烯酸玻璃(见图2),当 150°C 时尚保持140公斤/厘米²,这是值得人们注意的数据。

表2 PC与几种丙烯酸玻璃的热变形温度

材料名称	热变形温度(H.D.T.), $^{\circ}\text{C}$
PC	145
MIL-P-5425	96
MIL-P-8184	>100

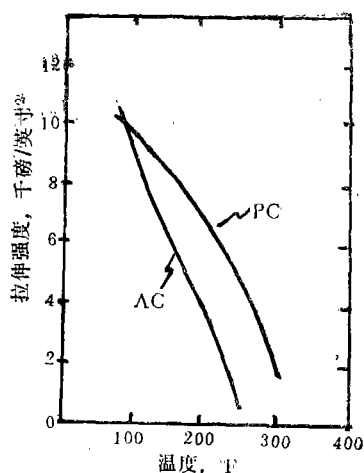


图2 PC和AC(丙烯酸玻璃)拉伸强度随温度的变化

2. 冲击强度高 切口冲击强度大大高于丙烯酸玻璃,是目前透明材料中名列前茅的(见图3)。用4磅重的鸟,以432公里/小时的速度撞击厚度15.5毫米的PC风挡后,材料完整无损,不仅丝毫不损于驾驶员,而且仍能保持正常飞行的可见度。同样情况下,约23毫米厚的拉伸丙烯酸玻璃,则归于失败。

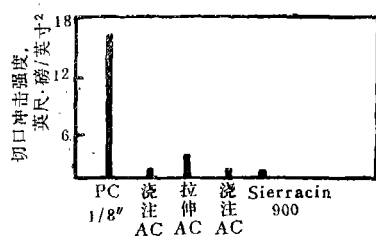


图3 几种透明材料的冲击强度

美国空军材料研究所(AFML)进行了各种温度下的拉伸强度、冲击强度、弯曲强度和热老化等30余项性能的系统研究后,得出结论认为:通过表面防护,PC可用于飞机玻璃并能延长其使用寿命。

PC所以能发展为新一代材料并在飞机上取得实用价值,还因为解决了技术上的某些关键问题。例如,PC制得的座舱盖,经飞行500~1000小时后就发雾,透光度下降,并且不耐溶剂,这是它性能的最大不足。美国以此

为重点，在空军的支持下，大力研究表面防护措施，先后进行了以下工作：

1) 最早使用浇注丙烯酸树脂直接热压在PC表面一薄层。首次报导F-15飞机风挡即用这种结构。由于丙烯酸树脂冲击性差，降低了材料的冲击强度。

2) 通过中间层制成复合玻璃。例如Swedlow公司发展的SS-5272Y (HT) 胶层。孟山都 (Monsanto Research Co.) 研究乙烯型三元共聚胶片“ETA”，牌号有ETA138200、ETANOX 078和ETAXXX 032。其中前者已为空军生产，用于丙烯酸/PC的飞机风挡；而后者则已通过热循环试验，表明耐热可达176℃ (350°F)。最近报导Sierracin公司以PC为主要材料的“Sylmar”型F-16超音速战斗机座舱罩。它是由该公司研究的硅化合物“S-100”和热塑性共聚物“S-130”两种新型胶片层合丙烯酸/PC，制成“三合”结构泡形座舱罩。估计它的寿命可由原来仅用硬涂层的单层PC座舱的18个月提高至72个月。1977年开始计划在F-14和F-15上作努力。这项被称为“MANTECH”的计划，是该公司为空军探索和提供一项超音速歼击机风挡和座舱新材料的开发工程。

3) 表面防护涂层。曾经报告效果满意的是Sierracin公司的Sierracote 233透明涂层，解决了耐磨、耐溶剂和耐气候问题，用于F-15、F-16飞机风挡和座舱的PC表面，不影响冲击强度，还使透光度从83.4%提高到87.1%，图4

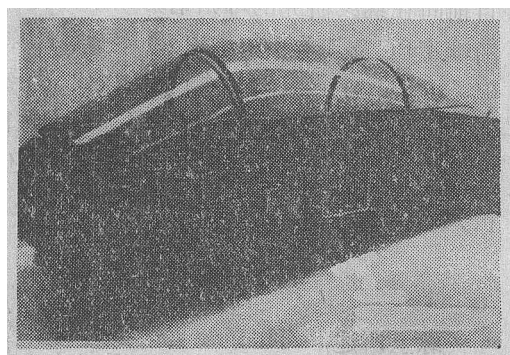


图4 使用涂层的F-15 PC风挡和前后座舱罩

是使用该涂层的F-15PC风挡和前后座舱罩。

几年后，Sierracin公司认为薄涂层耐紫外线、耐雨水和冰雹的性能不理想，因而他们研究发展了一种涂于飞机PC透明材料表面、称为“Sierraclad”的脂肪族聚氨酯（厚度为0.7~1.5毫米），并进行了一系列试验，其结果如下：

1) 耐水性：在200°F、相对湿度99%条件下，经30天后硬度变化很小，250°F过热蒸气作用10小时变化也很小；

2) 耐气候性：在加速气候老化30天后，对冲击和颜色均无影响；

3) 耐磨性：Taber磨损试验后表明，耐磨性较PC和丙烯酸玻璃好得多（见表3）；

4) 跌落冲击和雨水冲击试验：结果见图5和6。

表3 Taber磨损试验结果

材 料	磨损后雾度，%
PC	53
浇注丙烯酸玻璃	20
拉伸丙烯酸玻璃	35
聚氨酯	12~24

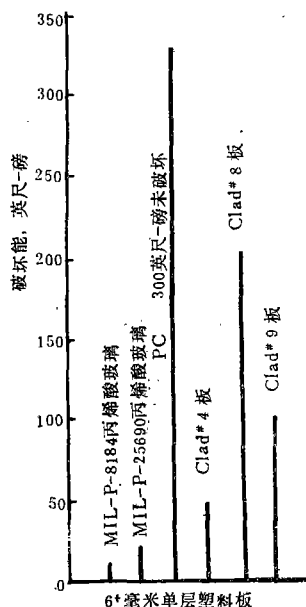


图5 -75°F时跌落冲击强度

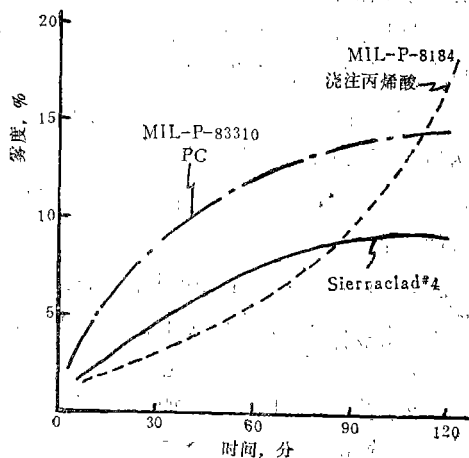


图 6 30天加速气候试验后雨水冲击
30°角, 345米/小时速度

根据试验结果认为耐磨、耐冲击、耐雨水性能优良, 耐气候性比薄涂层好。他们将这个带有Sierraclad涂层面的PC板制件在三架F-15上模拟 $M=2.5$ (325°F) 进行热循环试验, 结果没有影响。1976年已提供两套T-37飞机风挡进行飞行试验, 并生产YF-16风挡和座舱盖进行评价。

今年三月又报导Rohm&Haas公司发展了一种牌号为“Tuffak CM 2”的涂层, 涂于PC板, 透光度为82~86%, 但突出的是解决了耐磨性, 改进了耐气候性。例如耐加速老化>4000小时, 在佛罗里达州自然老化可达二年。推荐用于高速运输工具的透明外壳。最近空军还透露利用 Marks Polarized Co. 公司的超硬涂层保护PC进行飞行模拟试验。

除大力解决表面耐磨、耐溶剂和耐气候问题外, 为解决PC存在的应力开裂, 也取得一些进展。最近摩贝 (Mobay) 公司提供 E-810, E-811新品种, 改进了“应力集中”问题, 使同样厚度 ($\frac{1}{4}$ 英寸) 的板, 其冲击强度由原品种 Merlon M-50的 2.4 提高到 16.9 英尺·磅/英寸。这是值得注意的动向。

美国空军部门曾就通用电气公司 (General Elec. Co.) 的“Lexan SL-2000-111”和摩贝公司的“Merlon M50 U”作飞机专用

材料, 在进行了一系列性能研究后, 提出“PC透明材料板设计准则”, 制订了军用规范 MIL-P-83310, 并在F-15、F-111 (使用 General Elec. Co的航空级PC) 以及F-14、F-16飞机上作耐热座舱盖。这些机种是目前美国速度分别达到 $M=2.5$ 和 $M=2\sim 2.3$ 的最先进高速战斗机, 据报导已接受国外订货并装备部队。

从以上情况分析, 可以认为美国对PC进行了长期的探索研究之后, 对开拓和解决 $M=2.5$ 及其以下这类高速飞机所遇到的高温和鸟撞问题, 已取得重大进展, 成为一项新型有机透明材料在航空工业上取得实用价值。

(三)

英、法和西德就共同研制九十年代战斗机所达成的协议认为: “新型飞机的主要作用在于建立空对空优势”。速度, 是优势的重要方面, 苏联领先设计和制造 $M=2.8\sim 3.0$ 的米格-25、29就是证明。根据PC的热性能是不能承受 $M>2.5$ 所产生的气动力热的。因此, 美国空军阿蜜斯 (Ames) 研究中心于七十年代初, 开始致力于满足目标为 $M=3.0$ 耐温要求的有机透明材料。AFML首先对14种材料进行了评价; 后来又由古德伊尔航空空间公司 (Good-year Aerospace Co.) 从很多供应商提供的60种可用材料进行筛选, 其结果表明: “探索研究耐高温透明材料, 遭到了一次失败”。他们除对几十种商品和研制材料加以否定外, 目前尚在继续研究的可归纳为以下几种: (1) 酚酞型PC及其共聚物; (2) 聚芳砜和聚芳醚砜; (3) GAC-590; (4) NR-140; 据了解这些均系芳杂环高分子化合物, 无论在性能上, 还是工艺技术上, 要作为航空透明材料还存在极大的问题, 有待探索研究。

(四)

综上所述, 可以了解美国耐热航空透明材料的研究和使用, 具有下列特点: (下转51页)

(上接第46页)

1. 研究先于设计要求, 而且往往随耐温要求高, 技术难度大, 而需更长的研究时间。Plexiglass 55 的研究先于飞机使用约 5 年; PC 从研究到试用于飞机约 10~12 年; 而目前 $M=3.0$ 的耐高温透明材料, 预计时间将更长, 其成败与否还难以判断。

2. 多种技术方案同时进行。例如第一阶段研究时, 仅限于丙烯酸酯路线; 其后则有五个方面: 丙烯酸酯多元交联; 聚酯; 聚碳酸酯; 环氧和复合结构。而以目前论, 则除了聚碳酸酯、聚芳杂环以及复合结构的技术路线外, 每项路线还有多种方案分别进行。例如解决 PC 表面性能的问题即是如此。

3. 发挥专业公司专长, 由很多部门同时承担研究合同。如对 PC, 从提供树脂、挤出板材到压力抛光、表面涂层、浇注层合等共有 8 个公司分别完成。目前探索更高温透明材料的工作也在较多部门中进行。

4. 由于 Plexiglass 55 的综合性能优良, 使用寿命较长, 加之成熟的运用定向拉伸工艺, 提高了丙烯酸玻璃的冲击韧性, 因而至今凡 $M=2\sim 2.3$ 及其以下的超音速战斗机、军用和民用运输机, 仍大部分使用它作透明座舱盖和风挡。但为满足更高速度的耐温要求, 美国的研究方向似已较多地从丙烯酸玻璃转向以 PC 为代表的聚芳杂环有机材料, 重点是解决光学性能、加工性能和老化性能, 探索用于高速飞机上的可能性。

我国航空有机透明材料从无到有, 品种从少到多有了很大发展, 生产和科研也积累了不少经验。为了加快实现四个现代化, 应当根据

国情, 学习和借鉴国外有益的先进技术, 先进经验, 努力促进我国航空事业的发展。依个人浅见, 我们应该立足现有丙烯酸玻璃, 狠抓薄弱环节, 努力提高质量, 开展基础研究和填空补缺的工作, 为在不太长的时间内, 使航空有机玻璃全面达到国外同类产品的最高水平, 尤其是光学、韧性和老化等问题。同时还必须认真进行国内外调查(包括对国外考察和引进技术、产品), 分析和总结国内外科研和生产的客观规律, 从而全面规划, 统筹协调全国设计、科研、生产和使用以及有关工厂、院、校的工作, 下决心走出适合于发展我国航空透明材料的技术道路。

主要参考资料

- [1] AD-A 032141, 1975.
AD-769344, 1973.
- [2] 塑料参考, 15, 1-28, 1972.
22, 1973.
- [3] Plast. World, 34(8) 10, 1976.
- [4] N-74-10112, 1973.
- [5] C.A., 84, 31853.
- [6] Пласт. массы, 12, 43, 1973.
- [7] AD-A021122, A026412, 1976.
- [8] USA 4045269, 1977.
- [9] AD-A059079, A059156, 1978.
- [10] High Performance Plast.
National Technical Conference
Society of Plast. Eng., 1976.
10, Ohio p.30.
- [11] Mod. Plast., 56(3) 50, 1979.
- [12] Aircraft Eng., 50(9) 10, 1978.