

美国五代战斗机座舱透明件技术的应用进展

冯海兵

中国建筑材料科学研究总院有限公司, 北京 100024

摘要 概述了美国五代战斗机座舱透明件技术的应用进展。美国第一代、第二代、第三代战斗机座舱透明件正面风挡是增强无机玻璃/胶片/增强无机玻璃材料结构, 正面两侧是弧形有机玻璃风挡, 后部分是有机玻璃座舱盖, 仅有防弹及提供飞行员视野观察等基本功能, 未采用任何功能膜层。美国第四代战斗机座舱透明件风挡采用有机玻璃/胶片/聚碳酸酯材料多层结构或聚碳酸酯多层结构, 早期采用了耐磨功能涂层, 后期部分型号采用了隐身功能膜层。美国第五代战斗机座舱透明件采用了单层聚碳酸酯材料结构、有机玻璃/胶片/聚碳酸酯材料层合结构, 全部采用了隐身功能膜层。隐身技术将向全天候、全方位、超宽隐身频带、智能化方向发展, 未来的战斗机将具备超宽频电磁、红外、声、激光、视频等全方位的超级隐身性能。提出了隐身技术可能会发展到采用金属网栅等为代表的超低电阻高透过率超结构隐身材料、超材料隐身、隐身无人机等方向。

关键词 战斗机; 座舱透明件; 膜层技术; 耐磨膜层; 隐身膜层

座舱透明件是战斗机的关键部件, 一般前面部分称作风挡, 后面部分称作座舱盖, 对飞机和飞行员的安全有重大影响。在飞行过程中, 座舱透明件能承受各种载荷作用, 特别是风挡要能抵挡外来物主要是鸟的撞击, 同时还必须为飞行员提供清晰的视野, 战斗机座舱透明件要求结构强度高、飞行员的视野宽, 有良好的冲击韧性和光学质量, 并能经

受恶劣的飞行环境。早期的战斗机座舱透明件要求能防弹以保护飞行员, 无任何功能膜层, 随着武器系统的发展, 不再需要防弹功能, 后来的座舱透明件主要要求防鸟撞、隐身、视野广等多种功能, 采用了耐磨抗划伤、隐身等功能膜层。

目前用于战斗机座舱透明件的材料有两大类: 一类为聚甲基丙烯酸酯(有机玻璃)材料, 另一类为

收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-10-29

作者简介: 冯海兵, 高级工程师, 研究方向为飞机透明件有机镀膜及涂层, 电子信箱: jravendale@126.com

引用格式: 冯海兵. 美国五代战斗机座舱透明件技术的应用进展[J]. 科技导报, 2021, 39(9): 24-35; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.09.003

聚碳酸酯材料。

早期采用有机玻璃,厚度在6~35 mm,后来采用有机玻璃/胶片/聚碳酸酯层合结构(层合结构由外层的A、中间层的B和内层的C层合而成,一般用“A/B/C”表示由外到内的层合顺序),目前最先进的

是采用体积注射制备的一体化单层聚碳酸酯结构座舱透明件^[1-5]。

战斗机有多种划代方法,按照不同的划代方法,美国F-22可以被看作是四代机,也可以被看作是五代机(表1)。

表1 战斗机不同划分方法

	旧西方标准(2012年以前)	俄罗斯标准	新美标准(2012年以后)
第一代	最大速度1.5倍音速,采用机炮等为武器,代表机型F-86/F-100等	最大速度1.5倍音速,采用机炮、近距离导弹为武器,代表机型米格-15、米格-17	亚音速、火炮,代表机型F-86
第二代	2倍音速、导弹、航电,代表机型F-104、F-4、F-5	最大速度2.8倍音速,代表机型米格-21、米格-25	超音速、机炮,代表机型F-100
第三代	电传、超视距、气动、涡扇、复合材料,代表机型F-14/15/16/18	把可变后掠翼战斗机单独列为一代,代表机型米格-23、苏-24	2倍音速、导弹、航电,代表机型F-104、F-4
第四代	4S:超机动、超隐身、信息化、超音速巡航4、超视距,代表机型F-22、F-35	代表机型米格-29、苏27、苏-30、苏-35、苏-37	电传、超视距、涡扇、复合材料,代表机型F-14/15/16/18
第五代	—	代表机型T-50、苏-57	4S:超机动、超隐身、信息化、超音速巡航超视距,代表机型F-22、F-35

战斗机划代之争,最主要的原因是政府和军火商之间的博弈,本研究介绍被国际航空界广泛接受的把F-22视为五代机的划代方法^[6-9],分五代战斗机来分别讨论美国战斗机座舱透明件技术的应用情况。通过对比美国五代战斗机座舱透明件技术的发展历程,可以借鉴美国在战斗机座舱透明件领域的失败和成功的发展经验,结合中国具体的材料、设备国情,少走弯路,研究适合中国战斗机的座舱透明件技术,有助于提高中国战斗机的整体技术水平。

1 战斗机座舱透明件技术

1.1 第一代战斗机座舱透明件技术

第一代战斗机的主要特点是喷气式、亚音速,从此战斗机从螺旋桨时代进入喷气时代,史称战斗机的“喷气革命”。第一代喷气机以航炮攻击为主,武器威力相差不大,空战能力主要取决于飞机的盘旋角速度和能量爬升率,机动性的好坏决定飞机的空战能力。代表机型为F-86等。

F-86佩刀战斗机(图1)是美国设计的第一代

喷气式战斗机,是早期设计最为成功的喷气式战斗机,于1947年10月1日首飞,1949年服役,前后共生产了5000余架,最后一架F-86直到1993年才退役。F-86系列战斗机正面风挡是增强无机玻璃/胶片/增强无机玻璃结构,正面两侧是弧形有机玻璃风挡,后部分是有机玻璃气泡座舱盖,未采用任何功能的膜层,仅有防弹及提供飞行员视野观察等基本功能^[10-11]。



图1 F-86佩刀战斗机

1.2 第二代战斗机座舱透明件技术

第二代战斗机的主要特点是:采用了更加成熟的喷气发动机和更加先进的气动外形(如后掠翼、三角翼、变后掠翼等),飞行速度突破了声障(部分

飞机的最大飞行速度超过了2倍声速),开始使用早期的空空导弹作为空战武器。典型代表有F-100系列战斗机和F-11“虎”等机型。

F-100“超佩刀”战斗机(图2)是世界上第1种实用化的具有超音速平飞能力的喷气式战斗机,为了避免超音速飞行时气动加热导致飞机结构强度降低,首次广泛利用钛合金,每架飞机的钛合金重量达到295 kg,于1953年9月开始装备部队,主要型号有A、C、D、F等,各型共生产2350多架,美国、法国、土耳其、丹麦使用过,该机在海上最大速度可达1238.93 km/h,最大航程为3209.96 km。F-100系列战斗机的座舱透明件由正面无机夹层防弹玻璃风挡和两侧弧形有机玻璃风挡及后面2个单层有机玻璃气泡座舱盖组成,2座舱盖之间加了一道骨架支撑,并且两侧各有一小块弧形有机玻璃座舱盖,未采用任何功能的膜层,仅有防弹及提供飞行员视野观察等基本功能^[12-13]。



图2 F-100超佩刀战斗机

1.3 第三代战斗机座舱透明件技术

第三代战斗机的主要特点是:采用非能量机动原理设计,强调超音速性能的战斗机。代表机型:美国F-4、F-5、F-104等机型。第三代战斗机忽视了机动性标准,因此不太成功。

美国F-4系列战斗机(图3为F-4G战斗机,是F-4系列中的一种)于1956年开始研制,1958年5月试飞,1961年10月开始交付海军服役,1963年11月交付空军服役,速度达到1.09马赫。F-4系列战斗机共生产6000多架,美国、德国、日本、希腊、以色列等多国使用过。F-4系列战斗机的座舱透明件由正面无机夹层防弹玻璃风挡和两侧弧形单

层有机玻璃风挡及后面两个单层有机玻璃气泡座舱盖组成,后面两座舱盖之间加了一道骨架支撑,并且两侧各有一小块弧形有机玻璃座舱盖,未采用任何功能的膜层,仅有防弹及提供飞行员视野观察等基本功能^[14-15](图3)。



图3 F-4G战斗机

诺斯罗普F-5系列战斗机(图4)是美国比较成功的出口飞机之一,1959年7月30日试飞,最大速度1.4马赫,共制造2000余架,出口到加拿大、韩国、沙特阿拉伯等多个国家和地区。单座型F-5系列战斗机的座舱透明件由正面单层有机玻璃风挡和后面单层有机玻璃气泡座舱盖组成,双座型F-5系列战斗机的座舱透明件由正面有机玻璃风挡和后面2个有机玻璃气泡座舱盖组成,均未采用任何功能的膜层,仅有防鸟撞及提供飞行员视野观察等基本功能^[16-17]。



图4 F-5 B战斗机

1.4 第四代战斗机座舱透明件技术

第四代战斗机的主要特点:符合能量机动原理设计、超音速,强调中近距离空战和空空格斗的多用途超音速战斗机。F-15战斗机是第一款符合能量机动原理的战斗机,其后的F-16战斗机服役,F-16战斗机是第一款根据能量机动原理精确计算后制造的战斗机,代表机型:美国F-14、F-15、F-16、

F/A-18、F-117。

F-14雄猫战斗机(图5、图6)是由格鲁曼公司研制的超音速多用途战斗机,主要执行防御、截击、打击等任务。F-14战斗机于1967年底开始研制,1970年12月21日首飞,1972年5月交付使用,最大速度2.4马赫,伊朗是F-14的唯一国外客户,前后共生产了700余架F-14,包括F-14A/B/D 3种型号,与一般战机最大区别在于它是空优战机,滞空时间长,航程远,具备空中加油能力。F-14系列战斗机的座舱透明件由正面无机夹层防弹透明件风挡和两侧弧形单层有机透明件风挡及后面2个单层有机透明件气泡座舱盖组成,后面2座舱盖之间加了一道骨架支撑,未采用任何功能的膜层,仅有防弹及提供飞行员视野观察等基本功能^[18-21]。



图5 F-14战斗机



图6 F-14战斗机具备空中加油能力

F-15鹰式战斗机(图7、图8)是麦克唐纳·道格拉斯公司研制生产的全天候、双引擎、高机动性重型战斗机,1972年7月首次试飞,1974年交付美国空军使用。F-15服役至今46年,总生产数量1200余架,各种改型数十种,外销以色列、日本、新加坡、韩国等国家。早期F-15战斗机座舱透明件由聚碳酸酯/胶片/聚碳酸酯层合结构的风挡和有机玻璃座舱盖组成,内外表面最初使用Sierracote220有机



图7 F-15E战斗机



图8 镀ITO膜的F-15A 76-0111战斗机

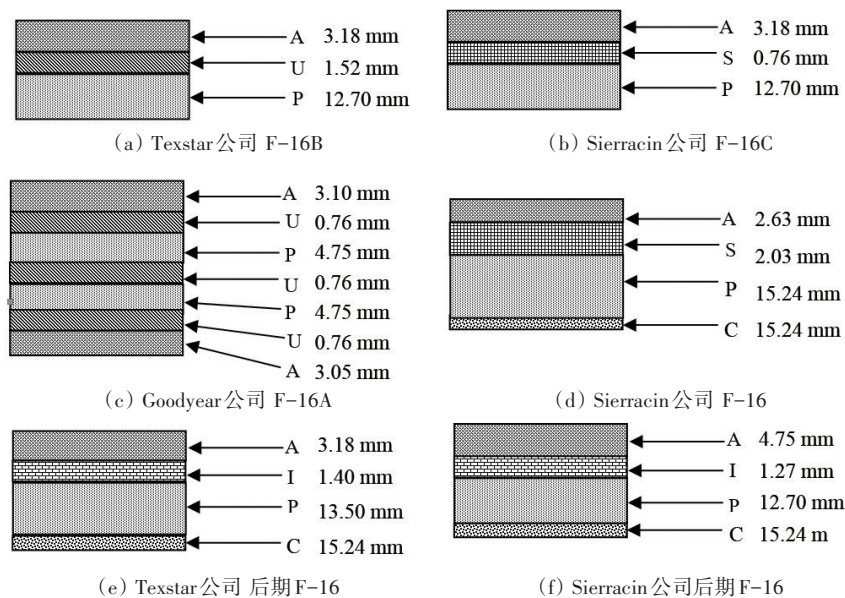
硅聚合物硬质耐磨涂层,自1972年7月起飞行100多次,100多飞行小时后无明显变化,飞行过程中遇雨、冰和尘土作用容易腐蚀,使用12~18个月后涂层附着力下降。后改用对溶剂、温度、湿度很稳定的Sierracote233柔性聚氨酯耐磨涂层,可使用2560飞行小时。早期未经改性的聚碳酸酯材料耐老化性能差,易发生紫外老化降解,造成采用的涂层分离,易产生维护损伤,导致过高的更换率和使用成本。因此,风挡结构又改用定向有机玻璃材料,采用定向有机玻璃/胶片/聚碳酸酯/胶片/定向有机玻璃多层结构,于1976年3月交付使用,内外表面均采用了Sierracote311有机硅聚合物硬质耐磨涂层,该涂层最适用于有机玻璃的防护层,但对聚碳酸酯的粘接性较差。20世纪70年代后期,部分F-15战斗机座舱透明件镀有绿紫色氧化锡导电膜(简称ITO膜),具有隐身功能,这是首次见到美国战斗机镀隐身膜的战斗机^[22-28]。

F-16战斗机是世界上最成功的战斗机种之一,1974年2月2日首飞,最大速度超过2.0马赫,1978年8月17日服役,F-16至今已有10多种改型:A型,基本型;B型,双座战斗/教练型;C型,A型的改进型;D型,B型的改进型,F-16A、F-16C的座舱为单人座舱,F-16B、F-16D为串列式双座舱。

总生产数量 4600 余架,美国空、海军共有 F-16 战斗机 2800 余架,大部分为 F-16C/D 型,国外用户有以色列、韩国、荷兰、台湾等 30 个国家和地区,所以 F-16 有“国际战斗机”之称。

F-16 战斗机的座舱透明件在材料、设计、制造和试验等多方面运用了一系列新技术,例如早期将风挡和座舱盖组合在一起达到最大连续无障碍视界,是最早的外形像延伸的水滴状一体化座舱透明件。风挡部分需要有较强的抗鸟撞能力,厚度一般是座舱盖后的 2 倍以上,采用一体化结构,整体重量显著增加,而且如此厚的透明件,采用传统的穿盖弹射救生有困难,另外使用过程中划伤无法修复,因而使用成本太高。后期将一体化座舱透明件改成前面风挡和后面座舱盖分开的结构,风挡部分采用定向有机玻璃/胶片/聚碳酸酯层合结构,座舱盖采用较薄的定向有机玻璃,就能采用传统的穿盖弹射救生^[29-35]。1972 年,Sierracin 公司制备了 2 件厚度为 9.53 mm 单层聚碳酸酯水泡式透明件装在 YF-16 飞机上,无膜层。其后,Texstar 公司制备了内外表面涂覆有 C254 耐磨涂层的厚度为 12.7 mm 的单层聚碳酸酯透明件,能承受 1.8 kg 的鸟以 556 km/h 的速度的撞击。接着为 F-16 飞机改型生产的透明件,单层聚碳酸酯的厚度增加到 18 mm 左

右,聚碳酸酯的内外表面仍涂覆有 C254 耐磨涂层,能承受 1.8 kg 的鸟以 741 km/h 的速度的撞击。当透明件与鸟相撞瞬间,透明件前面凹陷变形达 57.2 mm,导致与平视显示器的透明件相撞。1976—1980 年,美国 4 家公司分别发展了多种结构层合透明件,当时生产的涂层耐环境性能较差,同时缺乏外场面涂层用抛光设备,更换频率太高,因此改用定向有机玻璃来代替面涂层,无论在工厂内还是在军队外部使用场地,定向有机玻璃可以用多种抛光材料和抛光设备抛光处理。几种层合结构的 F-16 座舱透明件层合结构座舱示意图 9。Goodyear 公司 7 层结构的 F-16A 座舱透明件共生产 400 个就停产了。据 Ogden 空军后勤中心报道:2 层聚碳酸酯层合的 F-16 透明件表面用先进的涂层保护,能承受 1.8 kg 的鸟以 1000 km/h 的速度的撞击。1984 年开始,F-16 透明件在聚碳酸酯的内表面制备了方块电阻为 30 Ω 的透明导电复合膜——“太阳涂层”,该涂层具有减少热能进入座舱的功能,没有解决外表面的静电问题(图 10)。1993 年,Pilkington 航空和航天公司为空军生产了 3 件 F-16A/C 飞行试验件,这种透明件具有静电释放功能,是由单层聚碳酸酯制造而成,外表面采用了增强的导电膜,面涂层为牌号 ss-6831 聚氨酯软保护涂层,内表面



A 为有机玻璃;P 为聚碳酸酯;U 为聚氨酯;S 为有机硅;I 为中间层;C 为涂层

图 9 F-16 战斗机的座舱层合结构示意图

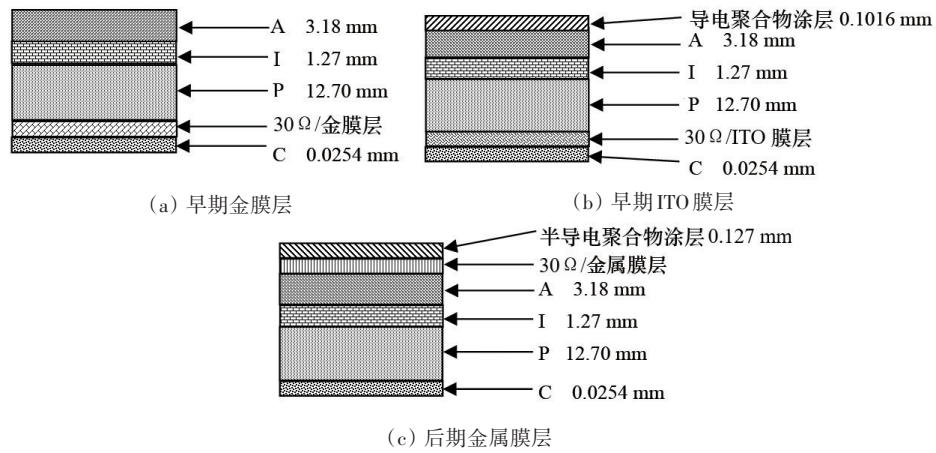


图 10 F-16 战斗机的隐身涂层结构示意图

采用牌号 ss-6590 有机硅硬涂层保护。透明件为达到兼有减少进入座舱的热能、静电释放和对雷达波隐身的功能,在有机玻璃的外表面先后采用了金、ITO、金属导电涂层,以后的隐身飞机的导电膜层都镀在座舱透明件外表面。导电涂层能够极大减少雷达波射入量,从而避免雷达波在座舱内反射

造成更大的回波,有助于减小雷达截面积(RCS),导电涂层采用金黄色的金膜、绿紫色的 ITO 膜^[36-42]或金属膜 3 种膜系^[43-44](图 11、图 12),部分带有静电释放涂层(ESD),美国空军研究实验室(AFRL)于 2019 年透露在 F-16 座舱透明件外层采用了疏水水力皮 HydroSkip。

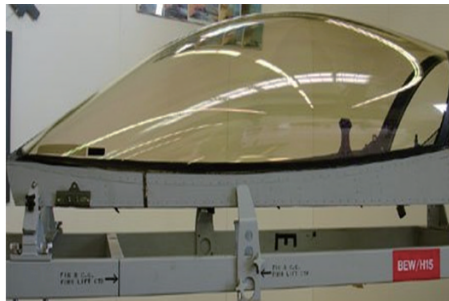


图 11 镀金膜的 F-16 无隔框座舱透明件



图 12 镀 ITO 膜的 F-16 座舱透明件

F/A-18(图 13、图 14)是美国诺斯罗普公司为美海军研制的超音速多用途战斗机,最大速度 1.8 马赫,该机于 1978 年首飞,1983 年服役,F/A-18 系列目前已生产 1500 余架,包括 A、B、C、D、E、F 型

等,出口到澳大利亚、瑞士、芬兰、马来西亚、加拿大、西班牙等国家。早期生产的 F/A-18 飞机座舱透明件风挡采用聚碳酸酯/胶片/聚碳酸酯多层结构,座舱盖采用单层有机玻璃,座舱透明件呈现出



图 13 F/A-18C 战斗机



图 14 镀 ITO 膜的 F/A-18E 战斗机

厚聚碳酸酯的暗蓝色,没有镀ITO或金膜,在内外表面采用了类似C254耐磨涂层来提高透明件表面抗划伤能力,延长使用寿命。后期生产的F/A-18飞机座舱透明件呈现出镀ITO膜的绿紫色^[45-48]。

F-117战斗机(图15、图16)是世界上第1种隐形战斗机,1978年11月开始研制,1981年6月首飞,1982年8月服役,共装备59架,2008年退出现役,最大速度0.9马赫。F-117的三角形座舱透明件采用增强无机玻璃+PU胶片+增强无机玻璃结构,非常沉重。其座舱透明件上为5片无机层合玻璃,其中前方3片,两侧2片。座舱透明件向后掀起



图15 F-117隐身战斗机

打开,前缘为锯齿状,可减弱座舱透明件和机身之间接缝引起的雷达反射,从透明件图片颜色推测透明件表面镀有绿紫色ITO导电膜,以避免雷达波进入座舱形成强反射,其RCS在0.01~0.001 m²,普通雷达在超过13~26 km的距离后就无法探测到F-117战斗机。而要达到如此低的RCS值,方块电阻小于几欧姆,在无机玻璃上容易高温制备方块电阻在几欧姆以下且不发生膜裂的ITO膜,因此推测F-117战斗机座舱透明件镀低电阻ITO导电膜是一个既能制备低电阻又能有较高透过率的较佳方案^[49-57]。

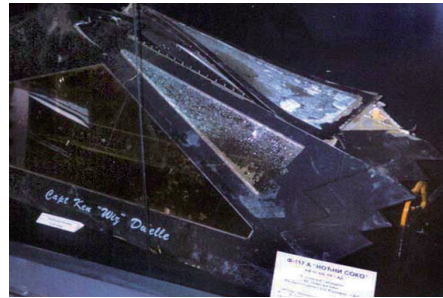


图16 82-806 F-117隐身战斗机座舱透明件残骸

1.5 第五代战斗机座舱透明件技术

第五代战斗机的主要特点是具有突出的隐身性能、超音速巡航能力、超常规机动性和敏捷性、全环境作战能力,简称4S,采用推重比为10的一级涡扇发动机、隐身技术、相控阵火控雷达和推力矢量技术等,以空空导弹为主要武器,美国第五代战斗机的典型代表是F-22、F-35。

F-22“猛禽”战斗机(图17、图18)是由洛克希德·马丁公司和波音公司联合研制的高隐身性战斗机,是世界上第1种进入服役的第五代战斗机,也是当今世界综合性能最佳的战斗机,1985年开始研制,2005年进入美国空军服役。据美国空军2005年11月份的报告说,F-22战斗机的雷达反射截面正面RCS为0.0001~0.0002 m²,俄防空雷达难以探测,作战效能是F-15战斗机的3倍,能在500 m长的跑道上起降,最大飞行速度2.1马赫,但价格昂贵,单机价格1.5亿美元。2009年4月,因价格昂贵经美国国会批准最终采购187架战斗机。该机的整体式座舱透明件尺寸达到了史无前例的3 m×1 m×

0.76 m的超大尺寸,重达163 kg,该座舱透明件采用约20 mm的聚碳酸酯材料制备,强度很大,弹射座椅已经无法使用传统的穿盖方式,改为使用火箭抛射方式。该座舱既能承受1.8 kg的鸟以1018 km/h的速度的撞击,还具有优异的隐身性能、光学性能、泄静电防雷击以及能抗雨、沙石的冲刷损伤等多种功能,尤其是舱盖上的涂层,具有“既软又硬”的特点^[58-63]。

目前,在战斗机座舱成形方面主要采用各种模具成形工艺,工艺极其复杂、废品率高、成本高、加工周期长;而F-22座舱透明件的制造目前用的是Envirotech公司于1963年开始开发的体积注射成形技术。体积注射成形是指大尺寸座舱透明件的成形技术,注射工艺是:将树脂在特种挤压机中加热熔化,然后将树脂聚集在一个专用设备内,保持高温和高压注射入模内直到完全固化为止,冷却后打开模具,再采用高精度数控机床进行加工。据报道,首件可飞行的体积注射成形的座舱透明件于2003年底在T38教练机上试飞,F-22的座舱透明

件在 2004 年试飞,材料为聚碳酸酯。传统的层合及压力成形再抛光方法的制造工时需 6 周,而用体积注射成形法只需几个小时。目前,EnviroTech 公司、波音公司及美空军已成功制成层厚达 66 mm 的飞机透明材料,并具有所需的结构性能及光学性能,处于世界绝对领先水平。另一种说法认为座舱透明件采用的是板材模压成形工艺,是由 2 块厚 0.9 cm 的聚碳酸酯片材叠在一起,2 个热压抛光面分别向外,将片材固定在活动框架上,加热使片材



图 17 F-22 猛禽战机

包覆在阳模上,然后抽真空加高压定型,随后在特种镀膜设备和设施中进行制备隐身涂层,然后进行精加工、钻孔及抛光,该涂层是由 Sierracin 公司与洛·马公司联合开发的。

从图 17、图 18 可看出,座舱透明件呈金黄色,无绿紫色,比 F-16 镀 Au 膜的颜色更明亮,推测采用的是 ITO/Au 合金复合隐身膜、钢铋复合膜、ITO 或 Au 掺杂高价金属元素(如 Zr 和 Ta 元素)等复合金属膜^[63-68]。



图 18 F-22 猛禽战机座舱透明件

F-35“闪电 II”战斗机(图 19~图 22)是由洛克希德·马丁设计及生产、多国参与的多用途战斗机,主要用于目标轰炸、防空截击等多种任务,发展出 3 种主要的版本,包括采用传统跑道起降的 F-35A 型,短距离起降/垂直起降的 F-35B 型,与作为航空母舰舰载机的 F-35C 型,其隐身设计借鉴了 F-117A、F-22 等的很多技术与经验,具备较高的隐身设计、先进的电子系统以及一定的超音速巡航能力,该机的头向 RCS 约为 0.065 m²,能够在雷达不开机的前提下发射导弹。F-35 战斗机于 2006 年 12 月 15 日首飞,最大速度 1.6 马赫。英国、意大利、加拿大等多个主要参与国计划在 2035 年前取得超过 6000 架 F-35。F-35 的座舱透明件仍是整体式

的,前面风挡部分采用定向有机玻璃/胶片/聚碳酸酯材料层合结构,考虑到飞行员弹射方便后面座舱采用较薄的定向有机玻璃材料,同前面风挡是一个整块有机玻璃,内部有加强隔框。从图 19~图 22 可看出,座舱透明件呈黄色和紫色,无绿色,要达到较高的隐身性能,导电膜方块电阻至少要小于几欧姆,在大尺寸有机材料上由于低温是很难制备方块电阻在几欧姆以下且不发生膜裂的 ITO 膜,目前尚未见到大尺寸有机材料材质上制备方块电阻在几欧姆以下且不发生膜裂的 ITO 膜的相关资料,全镀金膜电阻可以低到零点几欧姆但透光率又太低,推测采用的是 ITO/Au 金属复合隐身膜或 ITO 掺杂其他高价金属复合膜^[69-75]。



图 19 F-35A 战斗机



图 20 F-35A 战斗机



图 21 F-35B 战斗机



图 22 F-35C 战斗机

2 美国未来战斗机座舱透明件技术的可能发展趋势

随着科学技术的不断进步,隐身飞机正在不断向全方位、全天候、超宽频、智能化方向发展,隐身技术研究将在注重雷达隐身研究和应用的基础上,大力展开视频、红外、声、磁、激光、可见光等多方面隐身技术的研究。未来的战斗机将具备全方位的超级隐身性能,战斗机设计将采用超级隐身布局,战斗机的雷达散射截面积将小于 0.0001 m^2 。同时,世界各军事大国也在极力发展新型探测系统来提高对隐身飞机的发现能力,对飞机隐身要求越来越高,以后可能发展的趋势如下^[76-81]。

1) 采用以金属网栅等为代表的超低电阻高透过率超结构隐身材料。早期的金属丝用于电加热为主,有一定电磁屏蔽效果,例如美国 B-2 轰炸机风挡玻璃中就应用了金属丝,同时也镀了隐身膜层,这样复合的隐身效果在当时是最好的,随着加工技术的发展,将金属丝加工得更细、透光率更高成为可能,特别是解决了在超大尺寸复杂形状的有机材料上金属网栅的制备问题,将大大提高目前隐身水平^[82]。

2) 采用变换光学原理的新型超材料隐身。全世界对于超材料研究十分热门,有望将来应用到战斗机透明机隐身领域^[82]。

3) 新型透明金属复合膜代替 ITO 或 Au 等导电隐身膜具备全方位的超级隐身性能。

4) 新型透明耐更高温度的飞机座舱透明件用材料代替目前有机玻璃和聚碳酸酯材料,例如聚亚

酰胺,采用新的镀膜技术和工艺,能制备出超低电阻高透明的隐身膜层^[83]。

5) 等离子体隐身技术。空气的电离使电磁隐身成为可能,将飞机罩在一个“等离子体套”中,会干扰电离空气的巨磁性能,该技术虽不能消除雷达信号的返回,但可以使返回的信号失去其特性,对方的雷达操作人员无法评估目标的速度、大小及相对距离等。使用一台超过 20 万 V 的高压静电发生器产生等离子体,使飞机隐身时还能防护飞行器不受微波武器的袭击,一方面处于等离子体罩中,同时又抑制水蒸气凝结物的红外辐射。座舱透明件要求飞行员不受等离子体伤害而无需考虑隐身,需要研究座舱透明件上等离子的防护技术^[84-87]。

6) 电位差隐身技术。其方法是在飞机前缘充以正电荷,而在尾喷管出口处的气流中充以负电荷,前后两种电荷间的电位差达 1500 万 V,飞机前缘为阳极,尾喷管为阴极,在阳极与阴极之间嵌入吸收电磁能量的介电蒙皮材料,当在飞机前缘充以正电时,前缘周围的空气产生电离,达到隐身目的。座舱透明件要求飞行员不受超高压伤害而不用考虑隐身,需要研究座舱透明件上超高压的防护技术^[88-91]。

7) 隐身无人机,美空军正在秘密研制一种雷达探测不到的无人驾驶轰炸机“黑星”,其尺寸不到 F-117 战斗机的一半,该隐身无人机以其独特的高气动性能、低 RCS 及隐身效果极佳,难以用任何波段的雷达探测,如果发展到大量无人机代替目前的各种战斗机,战斗机座舱透明件将退出历史舞台^[92-93]。

参考文献(References)

- [1] 颜鸣皋. 中国航空材料手册 塑料透明材料复合材料胶粘剂[M]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- [2] 石琳. 现代飞机风挡及舱盖透明材料的发展[J]. 航空制造工程, 1994(12): 26-29.
- [3] 冷国新. 飞机风挡材料的选用[J]. 玻璃, 2001, 29(4): 45-46.
- [4] 陶公德. 飞机透明件及其制造技术的发展: 对美国西拉斯公司的技术考察[J]. 西飞科技, 1991(4): 33-36.
- [5] 张志林. 飞机座舱透明件设计理论及应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [6] 张聚恩. 关于战斗机的划代[J]. 国际航空, 2016(10): 26-26.
- [7] 温杰. F-22 摇身变成第五代战斗机——美国专家关于战斗机划代的最新说法[J]. 航空知识, 2007(2): 20-21.
- [8] 徐德康. 五代还是四代? 再谈喷气战斗机的划代[J]. 国际航空, 2007(2): 44-46.
- [9] 王云. 航空航天概论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [10] Murata M. Manufacturing of F-86-Jet fighter[J]. Journal of the Society of Mechanical Engineers, 1957: 88-194.
- [11] 王骅. 美国海军早期著名舰载喷气式战斗机F-86的海军兄弟: FJ系列战斗机[J]. 国际展望, 2004(4): 70-73.
- [12] 王伟. 美国F-100“超佩刀”超音速战斗机[J]. 现代兵器, 2010(2): 70-70.
- [13] 侯昕. 越战中的超级佩刀——美国空军F-100战斗机[J]. 航空世界, 2013(2): 74-77.
- [14] 陈肇祥. 追踪喷气式时代的冷战明星——巡天52年F-4鬼怪式多用途战机家族[J]. 国际展望, 2003(23): 22-31.
- [15] 罗晨. 图解美国空军F-4“鬼怪II”战斗轰炸机[J]. 军事文摘, 2017(1): 13-16.
- [16] 方方. 诺斯罗普F-5系列发展史——冷战飞鹰诺斯罗普F-5家族第一代全解剖[J]. 国际展望, 2005(7): 22-33.
- [17] 方方. 凌云之虎 第二代F-5战斗机[J]. 国际展望, 2005(8): 32-43.
- [18] 罗晨. 图解F-14雄猫战斗机[J]. 军事文摘, 2018, 411(3): 55-58.
- [19] Miller F P, Vandome A F, Mcbrewster J. F-14 tomcat [M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2009.
- [20] Miller F P, Vandome A F, Mcbrewster J. History of the F-14 tomcat[M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2010.
- [21] 白玮. 雄猫——F-14舰载多用途重型战斗机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2007.
- [22] 周光焱. F-15的材料和热工艺[J]. 航空材料, 1978(1): 36-44.
- [23] 杨大灼. F-15飞机用非金属材料[J]. 航空材料, 1979(5): 40-47.
- [24] 李超. 炮制雄鹰——简析F-15战斗机的结构、材料和制造技术[J]. 海陆空天惯性世界, 2008(3): 67-73.
- [25] Mcbrayer P R, Lockie D. The F-15 Air superiority fighter electromagnetic compatibility program[C]//1974 IEEE Electromagnetic Compatibility Symposium Recordd. San Francisco, California, 1974: 1-4.
- [26] 罗晨. 图解美国空军F-15A“鹰”式战斗机[J]. 军事文摘, 2016(8): 43-46.
- [27] Miller F P, Vandome A F, Mcbrewster J. F-15 Eagle [M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2010.
- [28] 林玉琛. 国外歼击机的发展趋势[J]. 现代防御技术, 2000(2): 1-9.
- [29] 杨大灼. F-16飞机用非金属材料[J]. 航空材料, 1982(5): 24-28.
- [30] 代延洪, 吴铁民. 从F-16A机身结构用材看现代战斗机选材特点[J]. 航空材料, 1986(6): 39-43.
- [31] 史伟琪. 面向21世纪的飞机透明件[J]. 航空制造工程, 1996(10): 1-4.
- [32] 张云阁. 歼击机座舱透明件技术[J]. 航空科学技术, 1995(5): 23-25.
- [33] Eylanbekov Z. Airpower classics[J]. Air Force Magazine, 2015, 98(10): 76-76.
- [34] Mccarty R. Finite element analysis of F-16 aircraft canopy dynamic response to bird impact loading[C]//21st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Seattle WA: AIAA, 1980: 80-0804.
- [35] Siddens A J, Bayandor J, Abdi F. Soft impact damage prognosis of F-16 canopy using progressive failure dynamic analysis[J]. Journal of Aircraft, 2015, 51(6): 1959-1965.
- [36] 史伟琪. F-16飞机的透明件技术[J]. 航空制造工程, 1997(5): 3-5.
- [37] 马玉凤. F-16隐身战斗机[J]. 上海航天, 1999(3): 62-62.
- [38] 孙滨生. 常变常新的F-16战斗机驾驶舱[J]. 国际航空, 2001(2): 57-58.
- [39] 郭福涛. F-16隐身改进后投入使用[J]. 飞航导弹, 1990(6): 12-13.
- [40] 沈玫, 纪建超. 飞机座舱透明件的隐身技术[J]. 材料工程, 1996(1): 10-12.
- [41] 雷炎. 压制歼-16印度空军瞄准“四代半”重型战斗机[J]. 坦克装甲车辆, 2020, 558(20): 32-35.

- [42] 哈恩华, 纪建超, 厉蕾, 等. 航空透明件有机-无机杂化耐磨涂层的应用研究进展[J]. 化工进展, 2010(10): 1913-1916.
- [43] 沈玫, 尹全启, 张云阁. 飞机座舱透明导电膜的研究[J]. 航空制造工程, 1998(5): 27-28.
- [44] Richard S, Robert M. Analytical evaluation of birdstrike against a F-16A laminated canopy[C]//29th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Williamsburg VA: AIAA, 1988: 88-2268.
- [45] 苏宇宇. 美国麦克唐纳-道格拉斯的F-18大黄蜂——全天候、超音速多用途战斗机[J]. 现代防御技术, 1983(6): 46-51.
- [46] Frederic P, Miller, Agnes F, et al. F/A-18E/F super hornet[M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2013.
- [47] 杨国才. 解读F/A-18E/F舰载战斗机[J]. 航空与航天, 2004(3): 26-31.
- [48] 郁宝华编译. 美国舰载战斗机的发展现状和发展趋势[J]. 外国海军文集, 2006(2): 13-16.
- [49] 陆柱蕙. F-117A飞机外形隐身性能的研究[J]. 系统工程与电子技术, 1990(6): 31-47.
- [50] Green M, Green G. Stealth attack fighters: the F-117A Nighthawks[M]. Mankato: Capstone High-Interest Books, 2003.
- [51] Stonier R A. Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf. Part II. Applications and design[J]. Sampe Journal, 1991, 27(5): 9-18.
- [52] Shripad P, Mahulikar, Hemant R, et al. Infrared signature studies of aerospace vehicles[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2007: 1-26.
- [53] Cunningham. Cracks in the black dike: Secrecy, the media, and the F-117A[EB/OL]. (1991-10-15)[2020-10-29]. <https://ir.library.illinoisstate.edu/fpml/50>.
- [54] Frederic P M, Agnes F V, John M. Lockheed have blue[M]. Saarbrücken: Alphascript Publishing, 2010.
- [55] 韦笑, 殷红成, 黄培康, 等. F117A隐身飞机的电磁散射特性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006(4): 492-494.
- [56] 捷飞. 隐形“夜鹰”覆灭记——F-117A战斗机被击落真相[J]. 航空知识, 1999(7): 34-35.
- [57] Kerr J. Lockheed Martin showcases innovation program in US[J]. Australian Defence Magazine, 2016, 24(10): 24-26.
- [58] Ponticel P. Resolving conflicts for F/A-22 cockpit canopy[J]. Aerospace Engineering, 2002, 22(10): 17-18.
- [59] 龚程奎. 国外先进战术战斗机概况与展望[J]. 科技视界, 2014(14): 67-68.
- [60] 史蒂夫·佩斯. F-22“猛禽”:美下一代优势战斗机[M]. 熊峻江, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [61] Henderson B W. F-22 first U.S. tactical aircraft to use true, all-glass cockpit[J]. Aviation Week & Space Technology, 1991, 134(20): 52-52.
- [62] Bailey, David C. F-22 cockpit display system[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 1994, 2219: 459-464.
- [63] 谭正平. “猛禽”核心美国F-22战斗机座舱[J]. 环球军事, 2007(2): 56-57.
- [64] Younossi O, Stem D, Lorell M, et al. Lessons learned from the F/A-22 and F/A-18 E/F development programs[M]. Samta Monica: RAND Corporation Monograph Series, 2005: 1-102.
- [65] 陈益. F-22及F-35的高水平隐身[J]. 航空维修与工程, 2007(1): 39-40.
- [66] 陈伟, 朱保魁, 刘新龙. T-50与F-22战机主要性能对比分析[J]. 飞航导弹, 2010(8): 45-47.
- [67] 张波. 高价金属元素掺杂透明导电ITO薄膜的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [68] 陈光文. 空中霸主——美军F-22“猛禽”战斗机[J]. 知识就是力量, 2018(8): 80-83.
- [69] 姜浩. F-35战斗机三维重建及气动、隐身特性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [70] 征惠玲. F-35作战能力综述[J]. 国防科技, 2013(2): 51-54.
- [71] 姜浩, 昂海松. F-35战斗机气动及隐身特性分析[J]. 飞机设计, 2010, 30(6): 1-10.
- [72] 高山. 会“隐身”的幽灵:F-35B战斗机[J]. 军事文摘, 2019(6): 38-41.
- [73] 刘亚威. 机器人喷涂在F-35的应用[J]. 航空科学技术, 2011(5): 16-18.
- [74] Kindamo B. F-35 update[J]. Military Technology, 2014, 38(7): 42-44.
- [75] 魏钢. F-35“闪电”II战斗机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.
- [76] 丁步东. 浅析美国空军隐身飞机的使用特点[J]. 现代军事, 2000(12): 25-26.
- [77] Geng J, Lv C, Guo Z, et al. Virtual visualisation-based approach for fighterstealth-coating analysis[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(Suppl 8): S8.46-S8.50.
- [78] 石林. 美国隐身技术何处去[J]. 航空工程与维修, 2001(6): 43-45.
- [79] 蔺国民, 孙秦, 李艳华, 等. 隐身飞机综述[J]. 航空制造技术, 2005(9): 73-76.
- [80] 李金梁, 涂泽中, 刘振庭. 美第六代战斗机研究进展情

- 况[J]. 电光与控制, 2014, 21(6): 9-12
- [81] Grant R, 马援. 美国空军隐身飞机发展回顾与反思[J]. 国际航空, 2009(5): 38-40.
- [82] 陆振刚. 基于圆环和双层金属网栅结构的光学窗电磁屏蔽方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [83] 朱根元. 美国航空用耐热有机透明材料的使用和研究进展[J]. 材料工程, 1979(51): 42-46.
- [84] 颜悦, 厉蕾. 航空座舱透明材料应用研究新进展[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [85] 北京航空材料研究院. 航空材料技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [86] 李清. 未来战斗机发展展望[J]. 国际航空, 2009(7): 51-53.
- [87] 凯新. 神奇的等离子体隐身[J]. 航空知识, 2008(4): 40-40.
- [88] 代红, 何丹. 飞机隐身与雷达反隐身技术综述[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 31(6): 40-43.
- [89] 廖新华. 对抗隐身飞机威胁最新技术发展[J]. 国际展望, 2005(14): 30-35.
- [90] 李成功. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [91] 文武, 李全胜, 邓江华. 美国空军“隐身”技术20年[J]. 航空世界, 2002(3): 17-19.
- [92] 邹服进. 光致变色玻璃的光色性能的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2004.
- [93] 李宝毅, 赵亚娟, 王蓬. 电磁防护超材料在国防领域中的应用与前景展望[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(5): 1-5.

Application progress for technology of American fifth generation fighter's cockpit transparency parts

FENG Haibing

China Building Materials Academy, Beijing 100024, China

Abstract This paper describes the application progress of American fifth-generation fighter's cockpit transparency technology. The US first three generations fighters' cockpit transparency front windshield uses the reinforced inorganic glass/film/inorganic glass reinforced material structure, the front side is curved plexiglass windshield, and the rear part of the plexiglass has bubble canopy, and it only provides bulletproof function of the pilot-field observation without any feature film. The US fourth-generation fighter cockpit transparency plexiglass uses pieces/film/polycarbonate material laminate structure, with early version using wear resistant functional coating and the latter version using stealth features film. The US fifth-generation fighter cockpit transparency uses polycarbonate structure and plexiglass pieces/polycarbonate material laminate structure, and uses stealth features film. Stealth technology is developing in the direction of all-weather, omni-direction, ultra-wide stealth frequency band, and intelligence. Future fighters will have ultra-wideband electromagnetic, infrared, acoustic, laser, video and other omni-directional super stealth performance. It is of great significance to learn from the failure and successful experience of the United States in the field of fightercockpit transparent parts. To study the cockpit transparent parts technology suitable for Chinese fighters will help to improve the overall technical level of Chinese fighters.

Keywords fighter; cockpit transparency; film technology; wear-resistant coating; stealth film ●



(责任编辑 王丽娜)