新的氟聚合物ETFE及在航空电线上的应用

六一一所　张耀中

由于飞机性能提高和用电设备增加，自五十年代起，飞机电缆使用量的增长十分惊人，使得电缆的平均百分比接近飞机总重的2%，竟成为电气系统中最重的项目，因此，航空电缆的小型轻量化成为迫切需要解决的问题。航空电线发展的方向，一是提高其安全可靠性，二是使它小型轻量化。

航空电线安全可靠性取决于绝缘材料耐燃不冒烟特性，它是降低飞机事故的一个重要因素。

航空电线小型轻量化的主要途径：

1.提高绝缘材料的耐热等级，例如使用氟聚合物绝缘材料替代聚氯乙烯绝缘材料；

2.用薄壁绝缘结构，例如使用推挤成形替代绕包烧结结构；

3.用高强度铜合金制成小截面线芯，它的导电率平均比铜降低10～15%，机械强度却提高1.6倍；

4.带状电缆的应用，它和扁平连接器的应用不仅减少重量20～60%，缩小体积25～50%．而且容易实现双余度，大大提高可靠性。

航空高温电线按其发展过程分为三代：第一代硅橡胶绝缘产品，主要在五十年代使用；第二代氟聚合物绝缘产品，是六十年代发展起来的；第三代聚酰亚胺绝缘产品和辐照交联氟聚合物绝缘产品，是七十年代发展和广泛使用的。

氟聚合物绝缘电线品种繁多，用途广泛、在整个航空电线中占着突出的优势地位。六十年代初还普遍使用聚四氟乙烯绝缘、玻璃丝编织的高温电线，目前国内还在使用。该电线的缺点除重量重、尺寸大外，还有在电缆焊接加工时玻璃丝对人体有害。1962年美F-4战斗机首先使用MIL-W-13878/4挤压聚四氟乙烯绝缘电线，显著地减小了飞机电缆的重量和外径。六十年代中期起两种高性能的MIL-W-22759聚四氟乙烯绝缘电线和MIL-W-81381聚酰亚胺绝缘电线得到了迅速发展。七十年代初使用的是挤压聚四氟乙烯（TFE Teflon）绝缘电线和添加无机填料的耐磨聚四氟乙烯绝缘电线。聚四氟乙烯绝缘电线除耐温高、电绝缘性优良、耐化学品好等特点外，还具有柔软和重量轻、外径小等优点；缺点是纯聚四氟乙烯机械强度不高、耐磨性较差，另外电线加工困难，制造长度受限制。耐磨聚四氟乙烯绝缘电线显著特点是具有足够机械强度、耐磨性好，使用在飞机高温区安全可靠；缺点是柔软性差。同时期发展起来的聚酰亚胺绝缘电线是新一代航空电线，具有优良的综合物理性能，外径重量最小，耐刮耐切割性特别好，标识清楚，最高工作温度为200℃。它的弱点是柔软性较差，制造较困难。七十年代中期出现了一种耐开裂的氟40(ETFE Teflon）绝缘电线，其最高工作温度150℃。氟40具有高抗电强度和机械强度，比重适中，既可熔化又可挤压，加工方便，因此可制成重量轻、尺寸小的高电温线。七十年代末又出现了辐照交联改进型氟40绝缘电线——一种新型的高性能航空高温电线，发展到目前已达到一个比较完整的系列，在MIL-W-22759内有第32、33、34、35和41、42、43单篇规范共7个系列产品。这类电线具有下列突出的优异性能。

1.小型化

飞机电线双层绝缘标称壁厚0.010in.(0.254mm)，内部装置线单层绝缘标称壁厚0.006in.(0.1524mm)。飞机电线双层绝缘结构在尺寸上跟现有的高性能高密度连接器，如MIL-C-38999、MIL-C-81511和MIL-C-83723

等等相匹配的。该类电线在尺寸上跟其它高性能电线，如MIL-W-81381/11和MIL-W-81381/12也是相似的。

2.轻量化

该类电线比未辐照交联氟40绝缘电线，如MIL-W-22759/16轻8～10%，比最轻的MIL-W-81381类似结构仅仅重2～5%。

3.耐燃性

该类电线满足MIL-W-81044、MIL-W-81381、MIL-W-22759、FAR-25和保险商试验室VW-1的耐燃性要求。

4.耐化学性

该类电线不受已有的飞机液体，包括液压油、燃油、润滑油、清洗溶剂（包括pH值到14）、冷却液和除冰液的影响。

5.真空稳定性

该类电线满足如NASA-SP-R-0022中列举的空间应用的泄气要求。

6.耐辐照性

该类电线是一种极好的外层空间用材料，因为它暴露在致电离辐照10^8rad（拉德）之后仍保持其功能属性。

7.耐焊烙铁性

因为辐照交联材料不会熔融和流动，所以该类电线具有突出的耐焊烙铁性。

8.易加工

在车间加工该类电线，使用通常的手动工具和自动设备，就容易打印、剥线、灌封（能和填充物粘接）和端接。另外，这种结构能借助大多数MIL-W-81044、MIL-W-22759和MIL-W-81381典型电线使用的标准工具加工。

9.柔软性

该类电线绝缘壁薄而坚韧，因而具有非常好的柔软性。它比其它薄壁的高性能电线更易弯曲，不需用卷轴装置，简易的安装就可得到显著的形状稳定性。

10.连续工作温度

该类电线被列为连续工作温度-65～150℃（镀锡导体）和-65～200℃（镀银或镀镍导体）。未辐照交联的氟40绝缘电线，如MIL-W-22759/17（镀银铜导体）和MIL-W-22759/19（镀银高强度铜合金）都规定最高连续工作温度仅150℃。

11.高温性能

有效的辐照交联提高了改进型氟40绝缘系统的高温机械性能，因而该类电线在其额定温度内具有突出的机械强度。每批材料的加速老化试验是在300℃、7小时条件下完成的。这个温度显著地超过氟40的熔点270℃，并且此时保证该材料的有效交联。

12.低温性能

在温度大大低于-55℃时，该类电线仍具有足够的性能。

13.机械特性

该类电线具有优良的耐切通性和耐刮磨性。在额定温度时的高温耐切通性大约是未交联氟40结构的两倍。这种物理性能的提高是通过改进型氟40的有效交联实现的。

在线对线磨损的范围内，该类电线超过其它所有高性能航空电线，呈现出优异的性能。

独有的绝缘系统结构体现在标准型结构具有内外双层绝缘。不同颜色的内外层绝缘都是辐照交联改进型推挤成形的氟40。明显差别的颜色分层为在因安装或长期磨损引起的可能损坏时提供一个有效的标记，并且该双层绝缘系统又提供一个切口扩散阻挡层（单层绝缘是做不到这点的），这样能有力地阻止外层绝缘裂痕和损害向内层扩展，大大地提高了航空电线的可靠性。这对飞机布线和其它高耐久性要求场合是必需的。

辐照交联氟40绝缘材料及其成品电线的物理和电气性能列于表1，典型规范产品性能比较列于表2。

从表1和2看出，辐照交联改进型氟40绝缘电线具有优良性能，可用熔化或挤出工艺制成小型轻量化的任意长度航空电线。该电线柔软性好，便于焊接加工，可节约装配时的费用和时间。

表 1

成品电线	典型值（20AWG飞机电线）
电压额定值	600 V
温度额定值：	
镀锡铜导体	−65～150 °C
镀银或镀镍铜导体	−65～200 °C
镀银或镀镍高强度铜合金导体	−65～200 °C
抗拉强度	7500 psi (5.25kg/mm²)
伸长率	80%
壁厚 飞机电线	0.010 in (0.254mm)
壁厚 内部装置线	0.060 in (0.1524mm)
介电击穿电压 飞机电线	27 kV
介电击穿电压 内部装置线	18 kV
表面电阻	10^6 MΩ-in
绝缘电阻	10^5 MΩ-1000 ft
绝缘材料	
介电常数（1kHz）	2.7
介质损耗角正切（1kHz）	0.001
体积电阻	10^{16} Ω-cm
耐氧指数	40

改进型氟40绝缘电线已在国外飞机，如DC-9、DC-10、波音747、波音767及F-16上获得广泛应用。预计，若采用MIL-W-22759/34(额定温度为150℃）和MIL-W-22759/43（额定温度为200℃）产品代替苏MиГ-21MФ飞机电缆用的БТВЛ和ПТЛ-200电线（都不包括其屏蔽电线），将可减轻电缆重量约40kg，节省空间约60%，整个线束外径可缩小近2/3。

推广采用辐照交联氟40绝缘电线，对于飞机设计选材、改善现用航空电线的质量，是很有现实意义的。

～ ～ ～ ～

（上接第43页）

研究指出，沉积速度随温度增加而很快地增加。从850℃起形成硬而致密的涂层，沉积速度可控制在每小时零点几到20μm厚。

在多相硬质合金基体上均匀沉积Al_2O_3层是很困难的，这是因为在各个相上形核速度不同之故。最好先涂镀一中间层，如TiC或TiN，然后再沉积Al_2O_3，这就大大提高层和基体的结合力，使其寿命成倍地增加。

和沉积Cr_7C_3一样，用CVD法沉积Al_2O_3层，在技术上是较困难的，目前沉积Al_2O_3的刀片，仅有国外少数制造商能提供。

（未完，下期待续）

表 2

性能	典型值（20AWG飞机电线） 辐照交联氟40绝缘 MIL-W-22759/34	未辐照交联氟40绝缘 MIL-W-22759/16	聚酰亚胺绝缘 MIL-W-81381/12
最大外经（in.）	0.062	0.062	0.058
最大重量(lb/Mft)	4.9	5.36	4.8
耐动态切通性(lb)（0.005in.半径范围，0.20in./min走刀）	58	32	91
耐刮磨性(周期)（0.005in.半径范围，2in.行程，3.0 lb负荷）	78	31	70
线对线磨损（损坏周期）（10^4）			
1.5 lb重量	500	1	60
1.0 lb重量	700	4	90
0.5 lb重量	1500	20	200
垂直耐燃性(每种规范)	通过	失败	通过
耐高酸碱值(pH>10）液体	通过	通过	失败
柔软性			
弯曲电线90°力(in.-lb)	0.21	0.19	0.50
回弹角度(°)	40	40	63

注：1in.=25.4mm；1 lb=0.4536kg；
1Mft=0.3048×10^6m。