

航空绝缘材料的发展和任务

潘顺清 周述芳

本文从三方面论述了航空绝缘材料国内外发展现状和我们的任务。第一部分着重阐述了环氧灌封材料、氟有机、硅有机、聚酰亚胺和聚芳酰胺等五类材料发展水平,新产品性能及国内生产情况;第二部分着重论述了开展绝缘材料之间相容性研究和配套研究的重要性、迫切性;第三部分从两方面阐明了当前航空绝缘材料研究的方向和基础建设任务。

The Current Development of Aero Insulation Materials and Our Task

Pan Shunqing Zhou Shufang

The article discusses the current development of aero insulation materials in three aspects both at home and abroad, and our task. The first part mainly describes the level of epoxy-filling material, fluoropolymer, silicone, polyimide, Nomex and etc., the properties of new products and the production in China. The second part is about the study of the importance and the urgency of the compatibility among the insulation materials and their insulation forming system. The final part deals with the tendency in the study of present aero insulation materials and the fundamental task.

绝缘材料是航空电机、电器制造中不可缺少的材料。它直接影响到电气产品的工作寿命、运行可靠性和技术经济指标的先进性。由于现代高分子合成化学和制造工艺技术的进步,人们研究出许多具有独特性能的新型高分子化合物,并以它们为基础制成各种新型绝缘材料。由于这些具有优异性能的绝缘材料的开发和应用,使电气绝缘方面的许多问题获得了很好的解决,产生了巨大的经济效益,对促进航空航天技术的进步和国防力量的增强起了重大作用。例如平均计算,电机绝缘厚度减薄 15~20%,同尺寸电机的功率可提高 4~10%;使用耐高温绝缘材料,电机绕组允许温升提高 20℃,其功率可提高 13~15%。国内牵引电机,采用了聚酰亚胺薄膜等新型绝缘材料后,同尺寸电机的功率提高了 15~45%,维修里程提高 0.6~1 倍,使铁路运输量提高 11%。由此可见,采用新型绝缘材料带来的经济效益是十分显著的。由于绝缘材料在电气技术中占有如此重要的地位,因此,国外对绝缘材料的研究、开发十分重视,发展很快。国内各有关部门也奋起直追,特殊功能材料不断出现。现将航空上主要绝缘材

料的发展和应用情况介绍如下。

一、绝缘材料发展情况

1. 环氧灌注绝缘材料

近年来,为了改进电气产品加工工艺、提高可靠性,灌注、灌封材料用量不断扩大。有的小电机,以往采用浸漆绝缘,为了改善导热性能和三防性能,提高工效,改用灌注绝缘。电器产品的插头、接线盒等也通过灌封提高可靠性。还有的电器产品,以前采用塑料压制成型,现在改用灌注成型,简化了模具,提高了性能,降低了成本。

目前,国内外应用的灌注、灌封材料品种很多,主要有聚酯、聚氨酯、酚醛、有机硅和环氧树脂,用得最多的是环氧类材料。环氧树脂,由于粘结力强,固化时没有低分子物产生,收缩率小,同时它的稳定性、电绝缘和机械性能优异,应用面不断扩大,品种发展也很快。除了双酚 A 型环氧外,尚有脂环族环氧(如 ERL-4201、ERRA-6300 等)、不饱和环氧、自熄性环氧、内增塑环氧、自固化环氧和杂环环氧等等。在固化剂方面,除一般酸酐和胺类固化剂外,还有增韧及稀释型酸酐固化剂,

如 PAPA、PSPA 和 HK-021 等。具有触变性能的添加剂也有不少品种,通过不同配方可获得耐热、硬度、流动性及收缩率各异的灌封材料,在灌封工艺上,除了常压灌注外,还有真空灌注和离心灌注。

为了克服环氧树脂脆性,改进固化物的性能,在固化剂的应用上采用了多种措施。有的采用第一固化剂和第二固化剂配合使用,既可加快固化速度,减少填料沉析,又可提高韧性和耐热性。特别值得提出的是用丁腈橡胶固化环氧树脂的体系。它用咪唑作促进剂,在室温时,咪唑和羧基丁腈橡胶生成盐,延长适用期,高温时放出咪唑,使环氧树脂迅速固化。高度交联的环氧部分和接枝的丁腈橡胶在微观上形成两相,增加了韧性,提高了抗疲劳能力。这方面,国外在研究和应用上做了很多工作,国内也已取得一定成效。

2. 氟有机绝缘材料

氟有机化合物以具有高的热稳定性、优异的耐磨性、电绝缘性和耐湿热性能而著称,目前世界上有五种氟树脂。

(1) 聚四氟乙烯树脂 (PTFE), 熔点 327℃, 工作温度 -250~

+260℃, 可以经压制、烧结后制成各类塑料零件。由于摩擦系数小, 可用于轴瓦等减磨材料, 也可制成航空仪表的微型轴承, 车制成的薄膜可作为导线绕包绝缘, 也可作为电机的槽绝缘和绕包绝缘。

(2) 聚四氟乙烯和全氟丙烯共聚物 (FEP), 熔点 250~296℃, 使用温度为-250~+200℃, 可用热塑性塑料挤出成型法制造导线和塑料零件, 特别是用它加工成的各种排线 (见图 1), 不但美观, 而且性能也很好。由于它的介质损耗小, 用这种导线传送微弱的高频讯号失真很少。这种排线我国还没有进行批量生产。

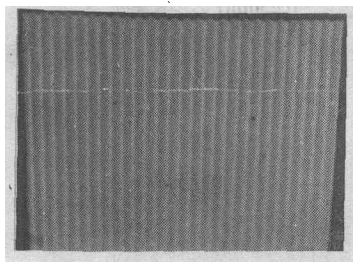


图 1

(3) 氟化烷氧基乙烯树脂 (PFA), 熔点 300~310℃, 工作温度-250~+260℃。它除了用于加工各种塑料制品之外, 同样用于制造导线和排线。这种导线国外已商品化, 我国正处于研制阶段。

(4) 乙烯-四氟乙烯共聚物 (ETFE), 熔点约 270℃, 工作温度-100~+150℃。用它制造导线, 不但性能优异, 而且价格较低, 适用于航空电器产品。这种材料在我国有待研究。

(5) 美国杜邦公司最近发展了一种新型热塑性氟塑料, 商品名为 Teflon-EPE, 性能介于 PFA 和 FEP 之间, 现产品有两个级别, 其中 Teflon-EPE-9800 为低粘度品级, 用于电缆绝缘和模塑加工; Teflon-EPE-9805 是高粘度品级, 用于挤出成型和模塑加工。氟塑料薄膜涂上胶粘剂后, 制成各种规格的粘带, 用于焊接绝缘和绕组绕包绝缘的

材料工程

端部固定。这种材料国内也有相应品种, 但粘结强度和适用期却大大逊色于国外产品。这种粘带见图 2。

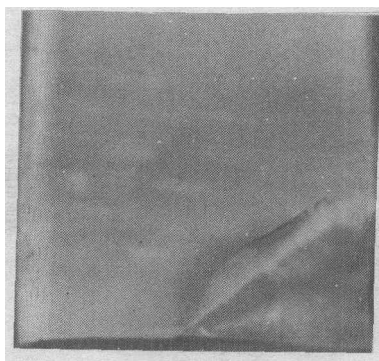


图 2

热收缩管, 国外已广泛用于焊接绝缘和出线保护, 国内正处于研制阶段。这种套管国外在军机和民机中使用都很广泛, 性能优越, 需求量大。我们必须加快发展步伐, 以满足航空电气发展的需要。美国生产的这种套管见图 3。

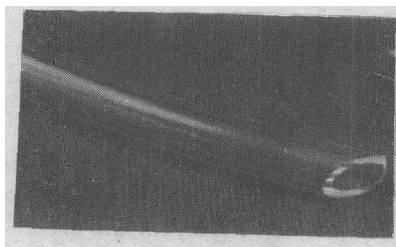


图 3

3. 硅有机绝缘材料

硅有机材料在航空上应用比较早。随着不断研究开发, 品种不断增加, 用量不断扩大。硅有机产品耐高温, 具有优异的电性能、防水性、耐候性、耐氧化性、阻燃性, 并且无毒无味, 使用寿命长, 再加上灵活多样的应用形式, 因此, 应用于航空工业的各个方面。

硅有机绝缘的电线电缆, 在潮湿环境中, 由于表面能低, 具有疏水性, 水分子在其表面不会形成水膜, 仅呈水珠状, 使绝缘性能下降很少, 广泛应用于航空点火电缆和输电电缆。这种电缆的突出优点是不易燃, 一旦燃烧, 产生气体也很少, 生成产物又是不导电的二氧化硅灰分。当电缆局部损坏时仍能应急使用; 阻燃性

能好, 燃烧时仅放出少量 CO 气体。

有机硅凝胶是比较先进的灌封材料。它固化后形成一种高分子量的弹性体, 在-65~+200℃温度范围内可长期保持弹性, 具有优良的电气性能和化学稳定性, 能耐水、耐臭氧、耐气候老化, 无色透明, 固化过程不产生低分子化合物。用它来灌封航空电器产品, 能达到防潮、防震、稳定参数的目的。有机硅凝胶在固化时线收缩率在 0.1% 以下, 并完全感觉不到热量放出, 因而能保证在固化时不损坏电子元件。同时, 由于它的机械性能好, 可用于无壳封装。这样, 既可以减轻重量, 又能够减少制造工序, 零件外表也清晰可见, 便于识别线路板上元件的数字和颜色标志。不仅如此, 当某个元件损坏时, 还易于拆除, 在更换元件后, 再进行局部灌封, 外观又可恢复原样。

有机硅凝胶可以在室温和低温下固化, 是一种低温固化高温使用的灌封材料。目前, 国内在少数航空电器产品的印刷电路板上试用, 效果较好。这对新品研制, 提高产品性能, 起到了积极作用, 但在品种规格上有待进一步发展。由于价格昂贵, 且对产品的清洁度及操作环境要求较高, 目前仅能用于特殊要求的航空产品上。今后必须加强对它的应用研究。

4. 聚酰亚胺材料

聚酰亚胺 (KAPTON) 材料, 自 60 年代被美国杜邦公司开发以来, 不论在数量上还是在品种上都有很大发展。它能在-200~+400℃范围内保持优异的力学、介电、耐腐蚀、耐火性能, 可以制成薄膜、纤维、涂料、粘合剂以及模塑料、灌注料和层压制品, 在航空电机制造中用作槽绝缘、层间绝缘和相绝缘。聚酰亚胺薄膜属“自熄”型, 不支持和扩散燃烧, 具有优异的韧性、耐磨性, 特别适用于航空电缆制造。由它绝缘的电线电缆比通常所用的挤出绝缘的外径大为减小, 可以有效地减轻飞机自身重量。例如波音飞机公司, 由于改用聚酰亚胺薄膜绝缘的电线电缆, 使机身重量减轻 300 磅。

近年来, 国外研制成下列新材料:

KAPTON F, 是在 H 薄膜单面

或双面涂复 FEP 氟树脂而成, 具有热封合性能, 防潮, 化学性能亦比 KAPTON H 薄膜有所提高。

KAPTON XT, 1985 年完成应用试验。该薄膜具有很强的散热能力, 比 KAPTON H 高一倍, 系用聚酰亚胺与铝混合制成的薄膜, 能用于 $-269 \sim +400^{\circ}\text{C}$, 用作电机导线绝缘和半导体绝缘垫板特别合适。

KAPTON XH, 其特点是升温时产生收缩, 在 200°C 时纵向收缩率为 8% (150°C 时已开始收缩)。达到完全收缩的时间长短, 取决于所用温度及热源性质。可作为导线及线圈绝缘, 或作螺旋管、套管等使用。

KAPTON XC 是一种含碳的具有特殊导电水平的聚酰亚胺薄膜, 其表面电阻可在 $100 \sim 10^{12}\Omega$ 范围内变化, 体积电阻为 $3.0\Omega \cdot \text{cm}$ 。

KAPTON XP 是在 H 薄膜单面或双面涂以 Teflon-PFA 制成, 1987 年进行应用试验。它有耐高温及高的粘附能力, 对自身、对铜及其他材料在高温下保持较高的粘合强度。

KAPTON XC¹⁰ 是含碳的聚酰亚胺薄膜, 其表面电阻为 $10^8 \sim 10^{12}\Omega$, 典型的表面电阻为 $10^{10}\Omega$ 。这种薄膜可用于抗静电及电荷消除方面。

KAPTON 600 是含碳的聚酰亚胺薄膜, 具有特殊的低导电水平, 其典型表面电阻为 600Ω , 体积电阻为 $30\Omega \cdot \text{cm}$, 可作为抗静电薄片, 用于电荷转移或扩散、静电复印技术、薄膜柔软耐热元件。

5. 聚芳酰胺绝缘材料

这是一种目前国外军机和民机的电机、电器制造中大量使用的绝缘材料, 可制成各种形状和厚度, 供不同场所使用。市售的有 Nomex 410、Nomex 411、Nomex 414、Nomex 418 等牌号。410 在抄制时经轧光机轧光, 改善了机械和电气性能; 411 未经轧光机轧光, 可作压缩的柔软衬垫或缓冲垫层, 并由于其多孔性, 比 Nomex 410 有更强的浸渍能力; 418 是含云母的, 根据用途不同, 可由 25~75% 重量的粉云母和 75~25% 聚酰亚胺纤维组成, 用作电机整流子片间绝缘、整流子圆形绝缘环、槽楔和相绝缘材料。这种聚芳酰胺云母纸, 在 200°C 、 $562\text{kg}/\text{cm}^2$ 压力下测定时,

抗压缩蠕变性很小。一般树脂粘结的云母压缩率在 10% 以上, 而聚芳酰胺云母纸仅 4%。

Nomex 410 型表面及体积电阻率与温度关系见图 4。

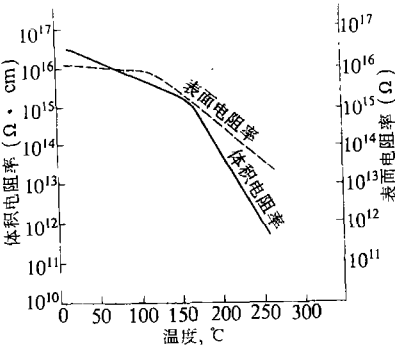


图4 NOMEX 410型表面及体积电阻率与温度的关系曲线(厚度为 10 密耳,即 0.25mm) 绝缘强度与温度关系见图 5。

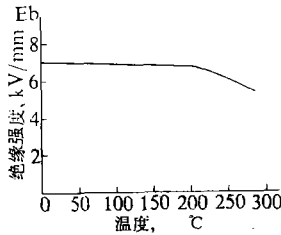


图5 聚芳纤维纸绝缘强度与温度的关系 介电常数与温度关系见图 6。

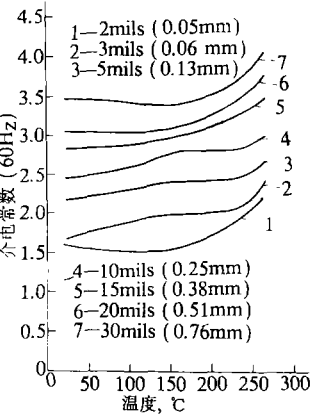


图6 NOMEX 410型介电常数与温度关系曲线 介质损耗与温度关系见图 7。

以介电强度下降到 $11.8\text{kV}/\text{mm}$ 为寿终标准的工作寿命见图 8。

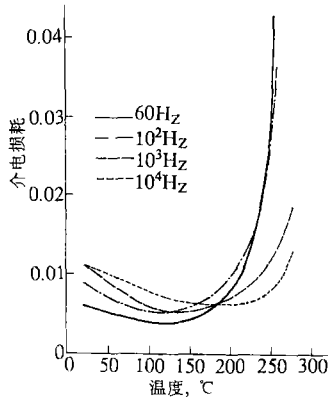


图7 NOMEX 410型介质损耗与温度关系曲线(厚度为 10 密耳,即 0.25mm)

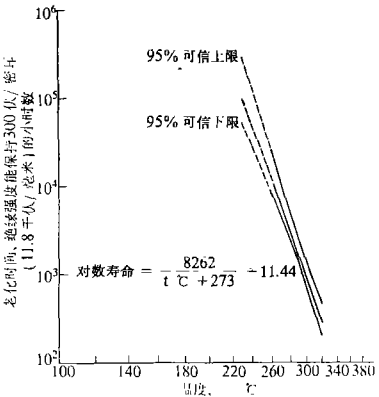


图8 NOMEX 410型使用寿命与温度关系曲线(厚度 10 密耳,即 0.25mm)

聚芳酰胺材料,目前主要靠进口,国内也有单位进行过研究,但质量有待进一步提高。到目前为止,世界上聚芳酰胺纸生产厂家主要仍是杜邦公司一家。

二、绝缘材料应用研究情况

1. 绝缘材料之间相容性研究

相容性问题本世纪 70 年代才引起人们重视,最早是从绝缘处理中发

现的。在电机、电器产品浸漆时,发现有的浸渍漆对漆包线或槽绝缘有不良影响。有时在电机运转过程中,由于绝缘漆收缩,会使漆包线上漆层开裂,甚至使漆包线的铜线和漆层变形,导致漆层和铜线分离。这种情况见图9和图10。前者通常是化学相容性问题,后者即是物理相容性问题。要使电机中绝缘材料工作寿命长,在浸渍漆和电磁线、槽绝缘之间不但要有好的化学相容性,还要有良好的物理相容性。国外电机、电器研究和生产部门,对相容性研究十分重视,国内有的单位也开始从事这方面工作,但航空部门,到目前为止,基本上没有开展相容性研究,材料选用带有一定盲目性。

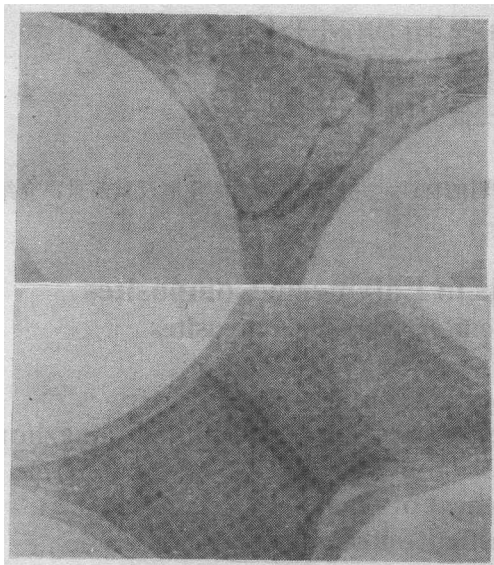


图9

图10

曾有人将以 Nomex 为主绝缘的两批模拟线圈,分别浸硅有机漆和聚酰亚胺漆后,进行寿命试验。从单一材料来说,聚酰亚胺漆比硅有机漆有更高耐热性和工作温度。实验结果却相反:浸硅有机漆的耐温指数要比聚酰亚胺漆的高 12°C 以上。当然,在同样工作条件下浸聚酰亚胺漆的电机寿命也只有浸硅有机漆的一半左右。这主要是聚酰亚胺漆和 Nomex 材料相容性不好造成的。由此可看出进行绝缘材料相容性试验的重要意义。

2. 绝缘材料的配套研究

绝缘系统不是绝缘材料简单的、机械的组合。它的性能是所选用各种绝缘材料性能的综合反映。系统中薄弱环节的存在是导致系统损坏的主要原因。在一台电机的绝缘结构中,选材料工程

用材料参差不齐,优劣并存,在好材料未充分发挥作用前,差的材料已失去功能;或者机械地从材料耐热等级评定结果进行配套,忽视了它们之间物理上或化学上的相容性,绝缘结构的寿命同样不会很长,整个电机的寿命也就大大缩短。这个问题,对干线客机电源系统尤其重要。确定一台新电机绝缘结构的一般过程是:单一材料的评选→材料间简单组合的相容性试验→绝缘结构设计和评定→电机的运行考验。其中评定绝缘结构的性能和寿命又分四个步骤进行:模拟线圈的热老性→机械振动→受潮试验→耐压试验。四个步骤为一个试验周期,循环进行,重复到线圈的一半损坏为止。

发达国家十分重视绝缘结构的配套研究,组织专门人员从事这方面工作。新电机研制时,它的绝缘结构都要经过评选;新机研制成后,它的性能和工作寿命,基本上已经清楚。这样能大大加快研制进度,同时也显著地提高经济效益。我国这种工作刚刚开始。

三、我们面临的任务

1. 提高材料质量,迅速组织专用绝缘材料生产

国外较先进的绝缘材料,我国大部分都能生产,但是材质上差别很大。例如,作为80年代国外主要绝缘材料的聚芳酰胺纤维纸,机械电气性能仅为国外的 $1/2 \sim 2/3$,品种也很少,国家必须组织力量,加快攻

关。对少数航空部门专用、而且用量又很少的绝缘材料,专业生产厂根本不愿投入人力、物力进行研究和生产。对这类材料,部内应组织专门力量进行研制和生产。

2. 重视绝缘结构设计,加强绝缘材料应用性能研究

绝缘结构在某种程度上可以说是电机的心脏。电机的可靠性和使用寿命,主要取决于所用绝缘结构的性能和使用寿命,而绝缘结构的性能不仅取决于组成绝缘结构材料自身的性能,更主要的是决定于它们之间的相互作用。要选出一套适合电机使用的绝缘结构,必须经过绝缘材料的筛选、相容性试验、寿命试验、工艺模拟试验及产品试验等漫长的工作程序,其工作量不低于一台电机产品的设计试验工作,并且这项工作必须做在电机设计之前,这样才能保证电机设计制造工作正确、迅速地进行。由于航空电机的特殊性,对它的研究更应加以重视。绝缘结构的研究,航空部门几乎是空白,导致长期存在航空电机性能低、研制周期长、故障多的弊病。为了保证航空电气产品赶超世界先进水平,建立一支航空绝缘材料研究队伍,加强对绝缘结构的设计,势在必行。通过试验,研究出一批新型绝缘结构,使新机设计有现成的绝缘结构可选用,这样不但能加快新机研制进程,而且也能提高质量,提高经济效益。同时要进一步开展低析气绝缘结构研究,以满足密封电器生产的需要。

3. 加强科研队伍的建设

与地面产品不同,航空电机电器的工作环境恶劣,性能和可靠性要求高,再加上我们基础差、底子薄,增加了研究工作的难度。为了赶超世界先进水平,有针对性地开展科学研究,完成一些专用绝缘材料的研制和小批量的生产任务,必须在部内形成一支强有力的绝缘材料应用研究队伍。只有这样,才能加快赶超世界先进水平的速度,才能适应航空工业发展和国防建设的需要。