

《国外机械工业基本情况》参考资料

电 工 绝 缘 材 料

桂 林 电 器 科 学 研 究 所

第 一 机 械 工 业 部 情 报 所

出版说明

在毛主席无产阶级革命路线指引下，在党的十大精神鼓舞下，我国机械工业形势一派大好。广大革命职工，高举毛泽东思想伟大红旗，深入开展批林批孔运动，狠抓革命，猛促生产，巩固和发展了无产阶级文化大革命的丰硕成果，毛主席关于“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平”的伟大号召，正在胜利地实现。

“知彼知己，百战不殆”。为了介绍国外机械工业基本情况，我们组织有关单位，按机械工业各行业分别编写出版一套《国外机械工业基本情况》参考资料。

毛主席教导我们：“……一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。”资本主义、修正主义国家的东西，必然打上资本主义的社会烙印和带有资产阶级的阶级偏见。因此，在参考国外情况的过程中，必须遵照伟大领袖毛主席的教导，采取分析、批判的态度。

本册为电工绝缘材料国外基本情况部分，编写单位是桂林电器科学研究所。

由于我们水平有限，编辑工作中定有不少缺点和错误，请读者批评指正。

第一机械工业部情报所

一九七四年

目 录

一、各国的生产发展和特点	1
二、产品	5
(一) 气体绝缘材料	5
(二) 液体绝缘材料	5
(三) 绝缘纸及纸板	5
(四) 合成树脂	6
(五) 绝缘油漆	7
(六) 粉末树脂	8
(七) 浸渍纤维制品	9
(八) 层压制品	10
(九) 压塑料	10
(十) 绝缘云母制品	11
(十一) 绝缘薄膜及其复合制品	12
三、测试分析技术	13
四、绝缘材料的应用	14
附录：若干国家绝缘材料及其制造厂简介	16
(一) 美国	16
(二) 英国	20
(三) 西德	22
(四) 瑞士	24
(五) 日本	25
(六) 苏联	29

一、各国的生产发展和特点

国外绝缘材料的生产，大致有两类型：一是以化工、轻工等部门为主要供应者、而电机电器的托拉斯或大企业本身，也适当生产一些以满足一般和特殊的需要。英、美、法、日等国皆属于这一类型。二是以电工绝缘材料厂和电机、电器厂的附属车间生产绝缘材料为主外，一部份品种和数量由化工、轻工等部门供应。苏修属于这一类型。

由于绝大部分新型绝缘材料，如合成树脂、油漆、液体和气体电介质，合成纤维，薄膜等都是三大合成的原料为基础，与石油、煤、天然气、酸、碱工业有关，而且，这些材料本身的生产技术，多是化工性的，因此，把化工、绝缘材料制造和应用研究三者结合起来，绝缘材料的发展也相应较快。

苏联

新绝缘材料的试制，生产和应用缓慢，往往落后于英、美等国。例如，硅有机化合物，苏联 1950 年试制以来，品种发展少，质量改进慢；聚酰亚胺，苏联从 1960-1966 年，持续试研了几年，迄今仍只是少量应用；芳香聚酰胺纤维纸，苏联 1973 年才报导“试制成功”。H 级和 C 级绝缘中对薄膜的粘合剂，还是以硅有机化合物代用，等等。

美国

为了利润和竞争一些新绝缘材料的试制和应用，先走一步。如聚酯酰胺，亚胺，抗氧漆性能比 Kapton 较好的聚酰亚胺等；这些新材料都是先用于军工，在扩大生产和降价后，再逐步用于一般电工制品。

目前，代表美国绝缘材料较高水平的材料是：

1. 60 万千瓦以上发电机绝缘的配套材料；
2. 750 千伏以上输电线路设备的绝缘，其中有以改性脂环族环氧用于 1000~1500 千伏的试验计划；
3. 漆包线漆，薄膜，含氟化合物，蒸发冷却用电介质等；
4. 耐温达 750~1500°C 各种军工用绝缘材料。

瑞士

瑞士本国用发电机单机容量，只有 15 万千瓦，但对电机绝缘系统有较多的研究。如 BBC 公司为美国制造了 100 万千瓦以上的火力和原子能发电机，其绝缘质量受到好评。

此外，CIBA 公司的环氧树脂系列产品，有独特之处。品种多，有各类双酚 A 型的有多种脂环族的，质量较好，故出口数量较多。以双酚 A 型环氧为基础的各类漆、胶、广泛为本国和别国电工所采用。脂环族环氧在高压系统中的应用水平，与英、美相当。

苏修曾采购 Ciba 公司的各种环氧，以作性能对比和应用试验。

日本

日本的许多绝缘材料，如硅有机，聚酰亚胺，热弹性胶等，开始都仿制于美国西屋和通用等公司。近几年来，在加强科研工作下，发展了一系列低温，中温快干有机硅漆，无溶剂的硅有机和聚酰亚胺等。其中有机硅产品，除本国自给外，还有相当数量的出口（见表 1）

此外,日本为了竞争市场,对各种绝缘材料的性能测试和应用技术,作了较系统的研究,所发表的一些论文,还译成了英文。

西德

西德所制造的发电机单机,其最大容量,近几年来才向 30 万千瓦以上发展。故高压绝缘未显示出特点。它的有机硅,聚酰胺,聚酯、聚酰胺漆包铜、铝线,聚酯薄膜和复合材料,质量较好。

近几年中,它还突出地发展了一套 F 级绝缘材料。1970 年欧洲统一设计的中小型电机绝缘方案,就是以西德的 F 级绝缘材料为基础制定的。

英国

英国有以下值得注意的几点:

1. 对高压、大容量电机的绝缘,推荐采用酚醛环氧。
2. 以脂环族环氧绝缘,试用于 6.6~400 千伏的输配电系统,已有数十年历史。
3. 粉云母纸进口。

法国

法国有以下值得注意的几点:

1. 高压绝缘材料(如发电机用),出售给罗马尼亚;
2. 以聚酰亚胺绝缘的 H 级牵引电机的质量较好。从法苏对比看来,法国的使用寿命要比苏长 10 倍。

各国为交流绝缘的科研,试制和应用技术经验,每年举行一次学术性会议。除经常发行各种定期刊物外,还出版汇编资料,如美国的电气绝缘的汇刊每两年出版一次,英国 BEAM 也是如此。

一些国家的新绝缘材料的试制和产量见表 1。

表 1 国外部分主要绝缘材料的发展、产量和用量

产 品 类 别	试制或生产时间	电工和非电工合计量	电 工 用 量	说 明	备 注
1. 硅有机化合物	美 1941 年试制 苏 1950 年前后试制	1) 1972 年全世界年产量达 5 万吨 2) 英国称 1975 年将生产 6 万 7 千吨 3) 日本 1964 年为 2631 吨, 1970 年为 8560 吨 1971 年预计 9500 吨, 1969 年出口 388 吨, 1970 年出口 738 吨	日本电力、电讯合用组约为 1/3。	1) 全世界产品中,军用 40~60%, 2) 美军、民用之比, 1969 年, 80:15~20, 1970 年后, 15~20:80	
2. 硅有机加工制品			占各分类材料总量的比重: 1. 有机硅层压品, 1965 年为 0.1%, 1970 年为 2%; 2. 有机硅橡胶布, 1965 年为 7.9%, 1970 年为 10.8%; 3. 有机硅云母品, 1965 年为 10.3%, 1970 年为 19.4%。		

(续)

产 品 类 别	试制或生产时间	电工和非电工合计量	电 工 用 量	说 明	备 注
3. 双酚A环氧树脂 及派生环氧树脂		1. 美销售量占全世界 总量1/2; 2. 欧洲销售量占全世 界总量1/3; 3. 欧洲各国每年约用 1000吨 4. 英国1968年为7200 吨 5. 日本产量仅低于美国	欧洲电气开关用量约 25% 英国电工、电子工业 用量: 1967年为30%, 1968 年为25%	近10年中, 全世界环 氧每年增长约10~15%	
4. 脂环族环氧树 脂	英、美等国1957 年小规模试制, 1965年扩大应用于 电工	脂环族、脂肪族等环 氧树脂约占全世界各类 环氧树脂总量的5%, 为2500~3000吨		以用于户外高压输电 电绝缘系统(如绝缘 子、开关等), 特殊电 器、高压发电机, 以及 特种电讯电器的绝缘	①Epoxy resin W.G. Poffe r 1970. ②BEAM cle, conf, 1970
5. 聚酰亚胺	美1959年合成, 1962~1964年小量 试制, 1967年后, 扩大应用于电工	美国1965年113吨, 1970年225吨 1972年 4500吨, 1974年计划 11300吨			
6. 聚酰亚胺薄膜		1. 美1964年为124吨 2. 1970年售100万磅 全世界1975年预计 22.7万吨	电工用40%, 航空和 军工用40%	E. I. de Pont de Nemours & Co. Inc.	
7. 聚酯纤维			电子设备约用1%		
8. 聚酯薄膜		1. 全世界1975年预计 9.5万吨 2. 日本三菱电机制造 公司三菱树脂(株)月 产350吨 3. 日本东洋レニニ (株)属ルニウ月产1700 吨 日本ルニウ的灌漑工 厂月产50吨 帝人株式会社1973年 起生产能力为750吨/年 法国保罗埃造纸厂 (130 LLORE) 年产 50吨	电子设备约用1%		
9. 耐燃聚酯膜				供印刷电路用	
10. Q 薄膜(耐 热聚酯薄膜)				供印刷电路用	
11. 聚丙烯薄膜			电容器和电缆用		
12. 芳酰胺纤维 纤维纸	美1962年制成, 苏1973年制成				
13. F 级浸渍漆			西德 DR. Beck & co GMBH 公司1970年占 总产量的17% 美、日分别占漆包线 漆总量的45%, 43%		
14. 聚酯漆包线 漆					

(续)

产 品 类 别	试制或生产时间	电工和非电工合计量	电 工 用 量	说 明	备 注
15. 缩醛漆			英国占棒包线漆总量的45%		
16. 层压板材		日1970年5.94万吨，其中纸的91.7%，棉布的7.2%，其它1.1%	电工用纸板为30%，印刷电路用25%，		
17. 增强塑料		美1971年41万吨	电工用胶4.28万吨，占10.4%		
18. 压塑料		美1968年14.3万吨 日1970年5.9万吨		日本电工用40%，电子工业用20%	
19. 粉云母制品		1) 美1960~1969年 年产量约占云母制品总量的25~30% 2) 日、苏各占云母制品总量的1/3			
20. 氯化合成油		1) 美1966年为11400吨 2) 日1966年为2400吨，1967为3000吨， 日本1970年，电器用18930吨38.8%；电讯用9808吨20.1%	日本86%量用于电容器，26%用于变压器	日本1972年6月停止使用三氯化联苯	
21. 酚醛压塑料		日本1970年总产量6251吨	电工用852吨占13.5%		
22. 三聚氰胺压塑料 聚酰胺树脂		美联合碳素公司4500吨/年		供注射和挤压制电绝缘制品	

二、产 品

(一) 气体绝缘材料:

在高压电器的技术发展中,六氟化硫(SF_6)越来越受到重视,并以它逐步代替常用的气体和液体绝缘材料。

纯净的六氟化硫是一种不燃不爆,无毒性的气体,在高温下对各种金属无侵蚀作用,有优异的介电性能。它的灭弧性能约为空气的100倍,它的电气强度在相同条件下为空气的2.5倍。

采用 SF_6 制造高压断路器和全绝缘组合电器,可大大缩小电器的体积,并节约结构材料,减少变电站占地面积。

有些国家的变电系统,采用 SF_6 绝缘后,由原来的郊区转入城内或地下敷设。目前美国制造了额定电压750千伏、断流容量54000兆伏安的高压断路器;其他国家,如西德、瑞士、日本、法国都相继采用了 SF_6 气体绝缘。

六氟化硫除在开关装置上应用外,还可在变压器上应用。美国1950年开始在变压器上应用 SF_6 。日本为解决变压器占地面过大问题,决定在60千伏以上的大型变压器采用 SF_6 气体绝缘。目前正在进行试验。此外, SF_6 在超高压电缆、电容器、避雷器上也在扩大应用。

最近美国又研制了,由 $\text{SN}(\text{R})\text{F}(\text{I})$ 、 $\text{SN}(\text{R})\text{OF}_2(\text{II})$ 、 $\text{S}(\text{NR})_2\text{F}(\text{III})$ 组成的混合新气体绝缘,性能比 SF_6 优异。实际使用效果尚有待观察。

(二) 液体绝缘材料

在高压电器和高压电缆的制造中,液体绝缘材料占有重要的地位。各国用量最大的仍是石油中提炼出来的各种绝缘油(如变压器油、电缆油、电容器油等)。各国在绝缘油的组成、净化、抗氧化等方面,进行了大量的研究工作,如日本从矿物原油直接分解的付产物中提炼多环烃油,可作B级使用。

除矿物油外,国外还采用各种合成油,如聚丁烯、氯化油、氟化油、硅油、有机酯、十二烷基苯、丙三醇等。其中聚丁烯合成油的报导较广泛,值得注意。

由于氯化油不燃,导热性好,介电常数(ϵ)高,特别适合在电力电容器上应用,也适合变压器的要求。但由于它有毒,各国都在研究氯化油的代用品(现已有),日本和瑞士禁止使用氯化油。

(三) 绝缘纸及纸板

绝缘纸及纸板由于成本低,可制多种规格绝缘制品;纸和纸的绝缘制品至今仍被广泛用于高低压电机电器、变压器及电缆的制造。

为了提高天然纤维纸的耐潮性和耐热性，国外对纸的改性作了大量的工作。如为了降低纸的吸潮性，研制了酰化纸，即将纤维素的羟基部分地乙酰化。美国 EastmanKodak 公司为了使吸湿性降低 50%，拟定的最合理的乙酰化范围 20~22%；为了提高纸的耐热性，研制了腈乙基化纸和胺添加纸，其耐热性可提高 20~30°C。

此外，还发展了其他许多合成纤维，如聚酯纤维纸、芳香聚酰胺纤维纸、聚丙烯纤维纸、聚二苯基苯撑氧纤维纸，聚碳酸酯纤维纸等。采用两层聚酯纤维纸与聚酯薄膜复合，制成了 DMD 复合制品以作为 B 级电机槽绝缘，采用两层芳香聚酰胺纤维纸与聚酯薄膜复合，制成了 NMN 复合制品以作为 F 级电机槽绝缘，由芳香聚酰胺纤维与粉云母混合抄制的纸，具有耐电晕性，可作为高压电机绝缘；聚丙烯纤维纸、聚二苯基苯撑氧纤维纸用于电缆工业，供制造超高压电缆等。

(四) 合成树脂

随着高分子合成技术的迅速发展，国外以合成树脂为原料的新型绝缘材料，逐步地取代了初级阶段的天然树脂（如虫胶、沥青、珞吧树脂等）为原料的老绝缘材料。

国外，绝缘材料行业中，有相当数量的科技人员，从事高分子合成理论的研究，合成了许多高分子聚合物，如环氧树脂、聚酯树脂、硅有机树脂、聚二苯醚树脂、聚酰亚胺树脂、芳香聚酰胺树脂、聚苯并咪唑、聚咪唑吡喃、聚苯并噻唑酮、聚萘二甲酸乙二醇酯和聚海茵——聚乙内酰胺等新型树脂。

美国在 1960~1970 年间，所发展的新型高分子聚合物，据不完全统计，约 28 种，其中芳杂环聚合物有 22 种。

在电工绝缘方面，应用量最大的是双酚 A 型环氧树脂。西欧各国每年约用 1000 吨，作为变压器、互感器、开关等浇注绝缘的环氧树脂数量约占 25%。至于户外电气设备浇注绝缘，英、美等国开始更多地采用脂环族环氧树脂。

近几年中，新发展的脂环族环氧树脂，供电绝缘用的品种有近 10 个。主要用途是：

1. 高压、大容量发电机和电动机，1967 年以来，英、美、日等国对于 15.7、18、24 千伏的大电机，有试用脂环族环氧树脂绝缘的报导（正式采用情况，尚待查明）。

2. 高压和超高压线路的绝缘子

在 3.3~220 千伏和 330~750 千伏输电线路中，采用了脂环族环氧树脂浇注的横担和抗张绝缘子。此外，还有试用于 1000~1500 千伏的研究课题（见 1970~1971 年 BEAMA 绝缘会议文集）。

3. 高压互感器

采用脂环族环氧绝缘的有瑞士 BBC 的 123 千伏系列，西德 (AEG) 的 220 千伏系列等。

4. 严酷环境中运行的大型电机和干式变压器

美国西屋电气公司 1966~1969 年间，以脂环族环氧绝缘成批生产的干式变压器，安装在 Miami, Florida, Shopping 等地区，已运行多年。

5. 其他

采用脂环族环氧绝缘的其他电器、电工零部件，尚有户外用高压开关，汇流排，引出导线等。

聚酯树脂的纤维与薄膜，在 E、B 级电机上广泛应用。美国的聚酯树脂产量最大，一直占世界第一位，预计 1975 年聚酯纤维和薄膜产量分别将达到 227000 吨和 95000 吨（非电工业用量在内）其中用于电子设备上的薄膜约占 1%。目前美国聚酯的生产仍以对苯二甲酸二甲酯路线为主，但预计此法将被淘汰。今后发展的重点是对苯二甲酸直接酯化路线。

聚酰亚胺树脂，是芳杂环耐高温聚合物最早工业化生产的一种，美国在 60 年代初期首先发展起来，由于聚酰亚胺在 -200 至 +260°C 宽温下，具有突出的机电、耐腐蚀、耐辐射等性能，可制成薄膜、浸渍漆、漆布、层压板和电磁线等产品。美国 1965 年产聚酰亚胺 113 吨，1970 年达 225 吨。目前受到各国普遍重视并有了一定的发展。

聚苯并咪唑，是芳杂环聚合物的第二大类，仅次于聚酰亚胺。它是由芳族四胺和二羧酸及其衍生物缩聚而成。美国 1961 年开始生产的聚苯并咪唑，是用 3,3'-二氨基联苯胺与间苯二甲胺酰缩聚而成，商牌号为 Imidite 850、Imidite 1850、ImiditeSA 和 Imiditepc 四个产品。

其中，Imidite 850 系由 34~35% 聚酰亚胺树脂的吡啶溶液组成，一般用作粘合剂。Imidite 1850 通常用作层压板。ImiditeSA 系用氧化硅微球和氧化铝-氧化硅纤维与聚苯并咪唑预聚体混合造成的，一般用作电工绝缘材料。后来又发展了 AF-R-100 和 AF-A-121 等聚苯并咪唑，AF-R-100 是由 3,3'-二氨基联苯胺和二苯基间苯二甲酯反应制得的树脂；这种树脂与玻璃布，在 371°C，200 磅/时²下压成层压板，在氮气中再经 315~371°C 24 小时和 399~454°C 6 小时后固化。AF-A-121 是用 3,3'-二氨基联苯胺与邻苯二甲酸二苯酯或间苯二甲酸二苯酯反应而成，具有较好的粘结力，主要用作胶粘剂。

硅有机树脂在产量扩大下，成本不断下降。目前硅有机浸渍漆和其他硅有机绝缘材料，仍在 H 级绝缘材料中占有重要地位并重视其发展。

近二年美国发展了一种耐高温聚酯，名为聚对羟基苯甲酸酯 Ekonol，可在 316°C 长期工作，在 371~427°C 短期使用，其性能与金属相类似。

（五）绝 缘 油 漆

绝缘油漆品种繁多，有沥青漆、酚醛漆、醇酸漆、聚酯漆、环氧漆、硅有机漆、聚二苯醚漆、聚酰亚胺漆和乙内酰脲漆等。各种类型的浸渍漆、漆包线漆、表面漆、复盖漆等广泛应用在电机电器制造上。

为了提高绝缘油漆的耐热性和机电性能，国外正以合成树脂为原料生产各种高级绝缘油漆，代替以植物油、天然树脂等为原料的低级的油性绝缘油漆。日本 130 多种绝缘油漆中，油性绝缘油漆品种仅占 13.2%。

美国、日本、西德、瑞士等为了提高电机绝缘质量和生产效率，发展了环氧型和聚酯型无溶剂漆，并在中小型电机上推广应用。无溶剂漆的浸渍工艺有滴浸、沉浸和整浸三种，中小型低压电机以滴浸为主，中型高压电机以整浸为主，已取得一定的成效。

国外为了提高电机的技术经济指标，增加电机的运行可靠性，最近几年大力发展 F 级绝缘材料，并生产了 F 级电机。西德以 F 级不饱和聚酯无溶剂漆代替 B 级浸渍漆，虽然绝缘油漆的价格提高 35%，但由于采用滴浸工艺，使整台电机的生产周期缩短，体积缩小，成本还有下降。1970 年 F 级浸渍漆产量，已占西德绝缘油漆总产量的 17%。

近十年来, 绝缘油漆品种和新工艺发展概况如下:

1. 浸渍漆方面, 目前出现了溶剂漆和生产电机的滴浸和整浸新工艺。

环氧型无溶剂漆的特点是固化速度快, 耐热性好, 机电性能高, 可作为中小型电机的滴浸漆; 聚酯型无溶剂漆的特点是, 贮存期长, 可作为中小型电机滴浸漆, 也可作为沉浸漆。美国芝加哥 Snerwin Williams 公司称采用不饱和聚酯无溶剂漆滴浸直径为 52~85 毫米, 长 200~500 毫米的电机电枢, 最大生产率每小时浸 800 台, 滴浸直径为 200×150 毫米 7 公斤的定子每小时 90 台。西德西门子公司、瑞士 BBC 公司、美国西屋公司等, 对中型高压电机制造工艺进行了革新, 采用整体浸渍工艺, 其工艺特点是: 包好的线圈先下入电机定子槽内, 然后将整个定子进行浸渍固化。

整浸工艺的主要优点:

- (1) 下线方便, 效率高并不影响质量;
- (2) 线圈端部得到了有效的固定;
- (3) 导线的槽部、端部以及全部线圈可充分浸渍, 线圈绝缘无空隙, 因而耐电晕、耐潮湿、耐油和耐环境污染等性能大为提高。

此外, 无溶剂的硅有机、聚酰亚胺、脂环族环氧浸渍漆, 也在耐高温电机、电器中逐步扩大应用。

2. 漆包线漆方面, 常用的漆包线漆仍是聚酯漆、聚乙烯醇缩醛漆、聚胺酯漆和油性漆包线漆等。美国和日本的聚酯漆用量较大, 分别占本国漆包线漆总量的 45% 和 43%。英国的缩醛漆用量较大, 占漆包线漆总量的 45%。最近发展了一些新型漆包线漆, 如聚酰亚胺漆、聚乙内酰脲漆、聚咪唑吡喃漆、聚酯-亚胺漆和聚酯酰胺-亚胺漆等。这些漆包线漆都具有良好的耐热性, 可用于 F、H 级电磁线。其中聚咪唑吡喃 H-8 和 C-8 耐热分别为 220°C 和 250°C, 并具有良好的耐磨性 (为缩醛漆的二倍); 聚乙内酰脲漆具有突出的耐热冲击性, 耐热 210°C, 介电损失角正切值在 200°C 以上才有增加。

此外, 国外在漆包线漆方面, 还增加了电泳漆类的新品种。以电泳工艺生产漆包线和电机电器绝缘件的日益增多。美国和加拿大的电泳涂漆的生产线有 42 条, 占电泳漆总量的 32%, 欧洲有 25 条电泳漆生产线, 占电泳漆总量的 9%。目前的电泳漆主要有环氧型、聚酯型和丙烯酸三类, 目前以环氧电泳漆居多。

环氧型、聚酯型和丙烯酸型三种电泳漆都是水溶性漆, 不用有机溶剂, 可改善劳动条件。电泳漆可涂复工件复杂、边角、缝隙多的任何金属或导线, 漆膜厚度均匀。

(六) 粉末树脂

近年来, 粉末树脂熔敷工艺, 已开始在中小型电机上推广应用。

粉末熔敷所用树脂, 主要是环氧和聚酯树脂, 环氧粉末树脂品种较多, 有高温环氧粉末, 弹性环氧粉末, 快固环氧粉末和低温固化环氧粉末等。

粉末树脂熔敷绝缘的主要优点:

1. 熔敷树脂能够均匀紧密地粘附在导体表面或槽壁上, 介电强度高, 绝缘厚度均匀, 可以有效地降低绝缘厚度和提高槽满率, 熔敷绝缘无空隙, 导热、散热性好, 可降低电机温升。
2. 工艺简便, 生产效率高, 可实现机械化生产。苏联的 II 系列直流电机, 以熔敷绝缘

代替原来工艺，每台电机成本可下降 55%。

粉末熔敷方法有三种：

1. 流化床涂敷法 (FBC 法)，它是在一遮盖的容槽中，将压缩空气通过一个多孔隔板吹入，使贮于槽中的粉末树脂悬浮成雾状，被涂工件先预热至树脂的熔点以上，放在容槽上 6 秒钟后，即可熔敷一层树脂。英国 Weybridge 厂制造的流化床可熔敷直径 190 毫米以下的电机定子；

2. 粉末喷涂法 (SPC 法)，是将工件预热至树脂熔点以上，放入喷涂室内，用压缩空气将粉末树脂通过喷嘴加压，喷到工件表面并受热熔敷在上，喷涂时间约 12 秒。一般形状不规则的较大工件，常用此法；

3. 静电喷涂法 (ESC 法)，是将工件放在高压 (一般为 6~10 千伏) 电场中，粉末树脂喷入后，藉工件上所带静电吸附其上，加热成膜。用此法可获得更薄的树脂涂层。

(七) 浸渍纤维制品

浸渍纤维制品主要有漆绸、漆布、漆管和硅橡胶自粘带等产品。

浸渍纤维制品所用的底材很多，国外有丝绸、棉布、醋酸纤维布、尼龙纤维布和玻璃纤维布等。后来又发展了聚酯纤维布，作为 E 级漆布底材，其抗张强度、延伸性较漆布优越，柔软性好、使用方便；以聚酯纤维 (经线) 和玻璃纤维 (纬线) 混织的 (聚酯/玻璃) 布，以补偿玻璃布的延伸性小、脆性大等不足之处。这两种漆布均可直切成带，用于包绕绝缘用。

美国杜邦公司于 1962 年发展的 F 级漆布，是用耐高温芳香聚酰胺纤维 (经线) 和玻璃纤维 (纬线) 混织 (聚酰胺/玻璃) 布。该漆布耐高温、延伸性好，可作 F、H 级电机槽绝缘。

浸渍纤维制品的发展：

1. 国外各种底材的油基漆布，仍占有一定的比例，人造漆布和尼龙漆布作为 A 级材料，聚酯和玻璃漆布作 E、B 级绝缘用。

2. 国外以合成树脂为涂料的漆布中，一般环氧玻璃漆布作 B 级绝缘用，日本日立的 VCT-F、改性环氧玻璃漆布、苏联哈尔科夫厂的 JICH 环氧聚酯玻璃漆布和英国的 Epoglex 环氧玻璃漆布作为 F 级绝缘用。苏联用 ПЭ-942 聚酯环氧漆制成的玻璃漆布比英国油改性聚酯漆的玻璃漆布 F 270-5003、F 270-4003 的基本性能优越，耐湿性好。

硅有机玻璃漆布，主要在高温操作下的电气设备中作 H 级绝缘，也有用在 B 级特殊环境和低温条件下工作的电机绝缘。硅有机玻璃漆布在 H 级电机上应用最广泛，数量也最多。

聚酰亚胺玻璃漆布在美国已生产应用。它的耐溶剂、耐油、耐辐射性好，有较高的电气性能，柔软性好，耐温 220°C，不燃，可作为 H 级电机绝缘和防爆、耐辐射电机绝缘。

3. 发展了自粘性玻璃漆布带和硅橡胶三角带等。

在正常情况下自粘带不需加热，就可使层与层间粘合好。国外自粘带用作扎紧绕组端头、固定中间插入层，绑紧引出线、层间绝缘以及线圈绝缘外层保护与固定等。

自粘带有环氧玻璃自粘带、硅橡胶玻璃自粘带、丙烯酸玻璃或薄膜自粘带和硅橡胶三角带等。其制造方法有研光法、轧滚法和刀涂法三种。可根据使用要求和耐热等级制造各种自粘带。

(八) 层 压 制 品

国外绝缘层压制品已有四、五十年的历史,目前电工用层压制品有近 100 个品种,美国已定国家标准的有 65 个,其中层压板有 34 个,层压管 12 个,模压管棒 19 个。从大量生产的品种组成来看,基本上是四大底材(即纸、棉布、玻璃布和石棉布)五大树脂(即酚醛树脂、环氧树脂、三聚氰胺树脂、不饱和聚酯和硅有机树脂)为主。美国 1970 年酚醛层压制品使用量为 49900 吨,酚醛、聚酯、环氧层压板三者的比例为 1:0.4:0.24,酚醛层压板居首位。日本 1970 年酚醛层压板使用量为 59436 吨,其中以纸为底材的占 91.7%,棉布为底材的占 7.2%,其它底材占 1.1%。日本用于电气的酚醛纸板占 30%,用于印刷电路的占 25%。

近二十年来,所出现的层压制品新产品:

(一) 一般类型的有:

1. 酚醛尼龙布层压板,其特点是,介电性能和抗冲击强度极好,耐潮,但耐热性差和有冷流蠕变的缺点;
2. 玻璃毡层压板,用玻璃毡代替玻璃布,可简化工艺、降低成本。聚酯玻璃毡层压板具有耐燃、自熄和耐弧等特点;
3. 环氧鳞片玻璃层压板,采用鳞片玻璃为底材,可降低成本,而且可得到介电性能高而吸湿性极微的层压板;
4. 环氧玻璃纤维层压板,以玻璃纤维布为底材,环氧树脂为胶粘剂可制成尺寸稳定、表面光洁的印刷电路板。其性能好,成本低;
5. 聚丁二烯树脂和丁苯树脂为粘合剂的层压纸板和玻璃布板,均具有突出介电性能,在 1 兆赫下介质损失角正切分别为 0.09 和 0.01。

(二) 耐高温的有:

1. 聚酰亚胺玻璃层压板。聚酰亚胺是近十年来发展的新型耐高温树脂,它与玻璃布制成的层压板,可在 220℃ 长期使用,电气机械性能良好,但由于价格昂贵,限制了它的发展。目前有薄板和印刷电路板等产品;
2. 聚酰胺-亚胺玻璃层压板。聚酰胺-亚胺是继聚酰亚胺之后(1964 年)发展起来的一种耐高温树脂,粘合强度比硅有机高得多,成本比聚酰亚胺要低,与玻璃布制成的层压板可作为 H 级或 C 级电气设备的绝缘材料;
3. 聚苯并咪唑玻璃布板,是美国 Narmco 公司 1961 年公布的新产品,可在 260℃ 以上保持其电气机械性能,在常温下介质损失角正切值与环氧玻璃布板相似。但由于价格昂贵,工艺复杂、加工困难等因素,限制了它的发展;
4. 聚二苯醚玻璃布板,其成本比硅有机层压板要低,抗弯强度和介电性能比硅有机的好,可作 H 级绝缘材料。

(九) 压 塑 料

国外压塑料品种较多,有酚醛压塑料、醛酚玻璃塑料、氨基压塑料、不饱和聚酯压塑料、环氧压塑料、硅有机压塑料等。在压塑料产品中,以酚醛压塑料产量最大,美国 1968 年酚

醛压塑料产量是为 14.3 万吨，比 1960 年增长 47.5%，日本 1974 年酚醛压塑料产量为 5.9 万吨，比 1965 年增长一倍。日本用于电工设备的酚醛压塑料占 40%，用于电讯设备的约占 20%。一般国家用于电气的酚醛压塑料比重为 60~70%。

为了提高劳动生产率，国外广泛采用注射成型工艺，对原有的热固性酚醛压塑料进行改性，增加流动性，以适于注射成型。目前已有 40% 的酚醛压塑料用于注射成型方法。注射成型工艺可提高生产率 10 倍，并改善了劳动条件。

近二十年，各国塑料的主要新产品：

1. 浅色酚醛压塑料。对于酚醛压塑料，除采用注射成型新工艺外，还要求颜色浅、美观。发展浅色酚醛压塑料的主要方法是以三聚氰胺改性酚醛树脂，并用少量有机磺酸盐处理后，获得浅色树脂，再用来生产酚醛压塑料；

2. 无氨或少氨酚醛压塑料，一般的酚醛压塑料是以六次甲基四胺作酚醛树脂的固化剂，该固化剂在高温使用时，会放出氨气，腐蚀金属。为了得到无氨与少氨压塑料，是选用不含 N 元素的固化剂，或其他合适的固化剂以及自行固化的树脂等；

3. 苯二甲酸二丙烯酯压塑料 (DAP)，其电气性和尺寸稳定性好，耐热性：邻位 DAP 是 150℃，间位 DAP 是 180℃。它在湿热条件下性能稳定。DAP 的产量：美国为 3000 吨，日本为 1000 吨。但由于其价格贵，发展不很快；

4. 不饱和聚酯压塑料，是由不饱和聚酯与玻璃纤维混合制造的压塑料。目前生产的有湿法不饱和聚酯压塑料 (PMC) 和低收缩湿法不饱和聚酯压塑料 (BMC) 两种。由于它的性能好，成本低，日益受到重视，日本年产量最多，约 10000 吨，美国为 3000 吨。

不饱和聚酯压塑料具有以下优点：成型性好，可低压成型，固化快，收缩率小，冲击强度比酚醛压塑料高 10 倍；热变形温度为 200℃。

除上述压塑料外还有硫醚压塑料 (PPS)，聚丁二烯压塑料和聚苯撑氧压塑料等新品种。

(十) 绝 缘 云 母 制 品

云母有很高的介电和耐电晕性，是大型电机绝缘不可缺少的材料。云母绝缘材料的品种有云母带、柔软云母板、塑型云母板、换向器云母板、衬垫云母板和云母箔六大类。

世界云母资源是稀缺的，云母产量最多的是印度，其次是苏联、加拿大和美国。工业发达的资本主义国家每年要从印度进口大量片云母，其中以美国和苏联进口最多。为寻求云母代用材料，各国作了许多研究工作。法国 1943 年采用造纸法试制出粉云母纸，1950 年投入工业化生产。美国通用公司首先把粉云母应用在大电机绝缘上，代替了片云母。此后，各国都相应的发展了粉云母绝缘材料。美国已发展了大鳞片粉云母，电性能比普通粉云母纸性能好，适宜作大电机绝缘。

近二十年来，国外粉云母绝缘的制造与应用都有新进展。在云母制品的品种上，美国共有 95 种，其中粉云母制品的品种有 52 个，占一半以上。日本和苏联的粉云母与片云母品种数相近。在产量方面，各国的粉云母绝缘材料比例逐年增加，美国 1960~1969 年 10 年间，平均每年生产的粉云母制品占云母制品总量的 25~30%，日本和苏联每年生产的粉云母制品占云母制品总量的三分之一。

国外大电机主绝缘的选用方面，环氧玻璃粉 (片) 云母绝缘已占优势，聚酯系列粉 (片)

云母绝缘有被取代的趋势。

环氧粉云母绝缘与沥青云母绝缘比较有如下优点。

1. 电气强度高，环氧粉云母绝缘比沥青云母绝缘高 40%，介质损失角正切值在 4% 以下，是沥青云母绝缘的三分之一；
2. 绝缘厚度均匀，环氧粉云母绝缘厚度可比沥青云母绝缘减薄 15%；
3. 热稳定性好，环氧粉云母绝缘在 80℃ 以上电气机械性能变化很小，沥青云母绝缘 80℃ 间电气机械性能下降 60%；
4. 机械性能好，环氧粉云母绝缘无松涨和蠕变现象；
5. 成本低，环氧粉云母绝缘所用的粉云母带和粉云母纸，系机械化或半机械化生产，生产效率。环氧粉云母绝缘的成本比沥青云母绝缘低 15%。

为了提高大电机绝缘的耐电晕性，国外还研制成功一种大鳞片云母纸，其中云母鳞片比通常的粉云母鳞片大。制成的粉云母带有较好的电气性能和耐电晕性，可提高电机绝缘的耐电腐蚀并延长使用寿命。

(十一) 绝缘薄膜及复合制品

薄膜是由合成树脂经拉伸或吹塑、延压、流涎等法制成。薄膜复合制品是由薄膜与青壳纸、玻璃漆布等复合而成。

国外电工用薄膜主要有：

1. 三醋酸薄膜是用三醋酸纤维素流涎而成，用于 A 级 (105℃) 电机、电器绝缘上；
2. 聚丙烯薄膜，是用聚丙烯树脂经双轴定向拉伸成型的薄膜，聚丙烯薄膜主要用于电力电容器上，代替电容器纸绝缘；
3. 聚酯薄膜，是用聚对苯二甲酸乙二醇酯经双轴定向拉伸而成型。它的机械性能优良，电气性能好，耐溶剂性好，可用在 E 级 (120℃) 也可在 B 级 (130℃) 电机电器绝缘上，一般多用在中小型电机槽绝缘上。为提高聚酯薄膜的性能，国外先后发展了 StochPak 热封聚酯薄膜和 Videne 线状共聚薄膜等；
4. 聚碳酸酯薄膜，由聚碳酸酯树脂经流涎而成，可用于 B 级电机电器绝缘。它的尺寸稳定性好，吸水性小，在高频下电性能比聚酯薄膜好；
5. 聚酰亚胺薄膜，由均苯四甲酸二酐和芳香二胺缩聚的聚酰亚胺树脂经流涎而成。可用于 H 级 (180℃) 电机电器绝缘，它具有优良的耐辐射性能、耐热、耐腐蚀、耐溶剂性好，还有良好的拉伸强度和延伸性。

美国的聚酰亚胺薄膜有 H 型和 HF 型两种，H 型为纯聚酰亚胺薄膜，HF 型是用聚氟化乙烯丙烯进行表面热封的聚酰亚胺薄膜。

近几年来，又发展了一些新型薄膜如帝人 Q 薄膜和聚乙内酰胺薄膜等。

日本的帝人 Q 薄膜是用聚 2,6-萘二甲酸乙二醇酯 (PEN) 拉伸而成型，PEN 分子链的平面比聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 好，薄膜的热收缩率非常小，尺寸稳定性好，耐热性为 F 级 (155℃)。电气性能与聚酯薄膜相接近。Q 薄膜机械强度比较差，这主要与 PEN 分子链的刚性有关。

聚乙内酰胺薄膜，是德国 Bayer 公司的聚乙内酰胺漆包线漆之后，发展起来的一种新型薄膜。其性能和用途尚待摸清。

三、测试分析技术

随着新型绝缘材料的不断发展和在电机电器上的应用, 以及为了合成更新材料等需要, 研究新材料的电气、物理、机械、化学和热老化性与高分子材料的分子结构的关系, 掌握其特性, 进一步指导科研和生产应用工作。国外对高分子材料除进行一般性能测试外, 还进行高分子材料的动力化学试验, 高分子结构、基团的分析和高分子材料的介电理论等的研究, 对进一步发展新材料具有一定的促进作用,

在测试技术上, 国外已研究采用波导管、谐振腔等新技术, 以测试绝缘材料在高频和超高频下的介质常数 (ϵ); 用动电容静电计测量体积电阻, 用变压器电桥测量介质损失角正切值等。

国外用的新型测试仪器有:

1. 日本安藤电气株式会社的 TRS-10 变压器电桥, 频率 30 赫~3 兆赫, 可测介质损失角正切值 0.1×10^{-5} 电容量为 0.01~200 微微法;
2. 瑞士 TETTEX 公司的 2801 高压电桥, 测量电压 350~900000 伏, 灵敏度 $1 \sim 2 \times 10^{-6}$, 测量精度 $1 \sim 5 \times 10^{-5} \pm 0.5\%$;
3. 捷克 TESLA 公司的 BM409Q 表, 测量 Q 值 10~1200, 测量电容 7~110 微微法, 测量介质损失角正切值 0.0001;
- 西德 SIEMENS 公司的自动平衡电桥, 测试电压 12 仟伏和 30 仟伏两挡, 电容测量 10 微微法~2000 微法, 测介质损失角正切值 0.0001。可直读各测量值, 并有自动记录器;
5. 日本株式会社的 TR84 B 和 TR84 m 振动容量型微小电流电位计, 测量电压 100、500、1000 伏, 可测体积电阻 1×10^{10} 欧姆;
6. 日本岛津制作所的 IS-5000 型万能试验机, 拉力 0.01 克~5000 公斤, 试验机速度 0.1~500 毫米/分, 温度范围 $-40 \sim +250^{\circ}\text{C}$, 可作抗张、抗弯、抗压和抗劈强度, 载重应力面积等试验项目。并带有试验记录器。

在高分子材料分析技术上, 国外采用红外光谱和发射光谱等仪器, 剖析高分子结构与基团, 有效地掌握高分子合成的反应机理, 加速了科研工作。以光谱分析与高分子力学试验相结合, 研究高分子结构与物理、机械、电气性能的关系, 更好地掌握其特性, 以利于科研工作的开展, 发展新材料。

美国利用红外光谱分析羟基值, 控制芳香聚酰胺反应终点。分析速度很快, 一般从取样到得出分析结果, 仅需 5 分钟, 比普通化学分析法要快得多。

在材料老化试验方面, 国外已有常规的材料老化标准与方法, 常规老化速度较慢, 一般半年以上。由于高分子材料发展很快, 新材料出来后, 就要确定其耐热性, 以便合理的使用, 故要求有一个快速老化试验方法。国外为了在短时间内确定新材料的耐温指数, 正在研究快速老化试验方法; 但到目前为止, 还未统一方法, 各国都处在研究阶段。

四、绝缘材料的应用

绝缘材料在电机电器中的实际应用效果，在一定程度上反映出绝缘材料的水平。有了新型绝缘材料在电机电器上的应用，又有先进的绝缘工艺方法，就能促进电机电器产品的技术发展。美国、日本、苏联、英国、西德、法国、瑞士和瑞典等国，均以环氧或聚酯粉云母绝缘生产高压大型电机，使单机容量有较大的发展。而芳香聚酰胺纤维纸的出现，推动了F、H级电机的发展。

国外大电机绝缘的发展趋势和科研动向是：

(一) 粘合剂或浸渍剂：以环氧树脂类的合成材料为发展方向，进一步提高树脂的电气和热态机械性能；

(二) 在环氧粉云母和环氧片云母之间，以环氧粉云母绝缘为多，并有完全取代环氧片云母绝缘的趋势；

(三) 绝缘应用技术的研究动向，是以不浸渍工艺为多，大电机线圈经过包绕压型也可达到与浸渍方法相同质量水平；

(四) 高压中型电机绝缘的研究动向，是以整浸工艺为主，正在研制适合整浸工艺的环氧粉云母带和无溶剂浸渍漆。

整体浸渍绝缘的特点是，绝缘性能好，并改善了导热性和抗震性。

目前国外大电机的容量与绝缘工艺如下：

(一) 美国西屋公司 Thermolastic 绝缘，是用环氧玻璃粉云母带连续包绕电机线圈，经真空浸渍热压成型。1959年制造了96万仟伏安2极和135万仟伏安4极的汽轮发电机；

(二) 美国通用公司 Micapal 绝缘，是采用改性环氧粉(片)云母带连续包绕电机线圈，经热液压成型。1969年制造了90.7万仟伏安2极和128万仟伏安4极汽轮发电机；

(三) 西德西门子 Mica!astic 绝缘，是采用环氧粉(片)云母带连续包绕电机线圈，经真空浸渍热压成型。1970年制造额定电压为26仟伏，容量为130万千瓦的汽轮发电机；

(四) 法国阿尔斯托姆公司 Isotenax 绝缘，是采用改性环氧玻璃粉云母带连续包绕电机线圈，热模压成型。已制造容量为60万千瓦的汽轮发电机；

(五) 日本东芝粉云母绝缘，是采用改性环氧玻璃粉云母带连续包绕电机线圈，经热液压成型，制造了16.9万仟伏安汽轮发电机；

(六) 瑞士 BBC 公司 Micadur compact 绝缘，是采用聚酯改性环氧玻璃粉云母带，连续包绕电机线圈，包好的线圈先下线，然后整体浸渍热烘固化成型。

原子能发电机绝缘：国外在原子能发电机方面报导不多，一般是采用聚酯亚胺、聚酰胺一亚胺、聚苯乙烯和硅有机等耐辐射性好的材料作为原子能发电机绝缘。

中小型电机绝缘：国外中小型电机绝缘多数为E、B级，有的产品向F级发展。美国、西德、日本、瑞士等国的F级电机，采用聚酯亚胺漆包线，芳香聚酰胺纤维纸与聚酯薄膜的复合材料作电机的槽绝缘，浸以环氧或聚酯无溶剂漆。B级电机采用聚酯纤维纸与聚酯薄膜复合材料作电机的槽绝缘，浸以环氧或聚酯无溶剂漆。