

一、环氧树脂在电工绝缘领域中应用的特点

二十世纪四十年代末，环氧树脂开始被应用于电工绝缘领域，至今已经有五十余年的历史。

双酚 A 型环氧树脂/酸酐体系是当前输变电设备绝缘浇注材料的主要品种，其优点突出：

- ✓ 具有良好的粘接性；
- ✓ 固化过程中收缩率低；
- ✓ 在固化过程中不产生小分子；
- ✓ 耐热性、耐药品性优良；
- ✓ 机械强度高；
- ✓ 电气绝缘性能优良。

但其缺点也很明显：

- ✓ 脆性大，抗开裂性能差：如产品浇注后开裂，存放期开裂，低温开裂，在线路运行中开裂；
- ✓ 脆性往往导致设备性能不达标：如局放不达标，耐冷热冲击不达标，动热稳定性不达标，绝缘子抗弯力不达标等；

随着对输变电设备性能要求的提高，问题越发突显出来。例如：

- 1、结构复杂的输变电设备及部件应力集中问题显著，更容易开裂；
- 2、设备使用条件更加严酷，如需要经受强烈温度冲击，适应电网运行波动，提高动热稳定性，保证长期质量，降低局放等。

二、环氧树脂绝缘层受力情况分析

产生上述问题的原因在于环氧树绝缘材料在输变电设备制造过程及使用过程中会受到多种力的作用：

- 1、固化过程中由于化学反应发生收缩产生的收缩应力；
- 2、环氧树脂与金属的线膨胀系数的差异产生的应力

表 2-1 几种常用材料的线膨胀系数

材料名称	线膨胀系数($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
石英	0.5
铝	~24
铜	~16
环氧树脂	~100

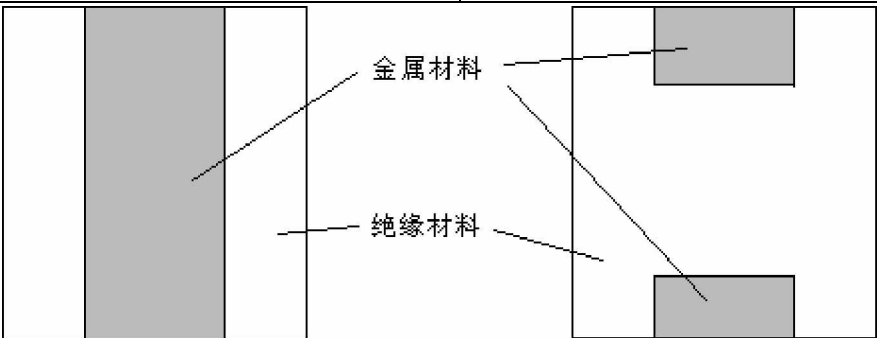


图 2-1 包裹或镶嵌金属零件的绝缘体示意图

3、绝缘层自身因温度变化而产生应力

4、电力与外力作用

可见，绝缘体受力是必然的，不能消除的，而且是不断变化的，这种应力的存在是使环氧树脂绝缘层产生内部裂纹的主要原因，而这种力又是客观存在的，因此只有提高环氧树脂本身抵抗这种内部应力的能力才是减弱和消除内部缺陷，从而降低局放的主要手段。

三、提高环氧树脂绝缘浇注制品品质的三个环节

1、设计合理

2、提高环氧树脂绝缘材料的韧性

3、浇注工艺合理

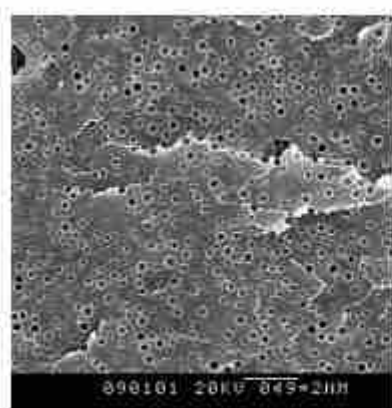
从以上三点来看，由于设计一般是固定的，所以运用合理的工艺和提高环氧树脂本身的韧性，减弱和消除绝缘体内部的气泡或缺陷是降低局放的根本方法。

四、提高环氧树脂绝缘材料的抗开裂性能是解决问题的关键

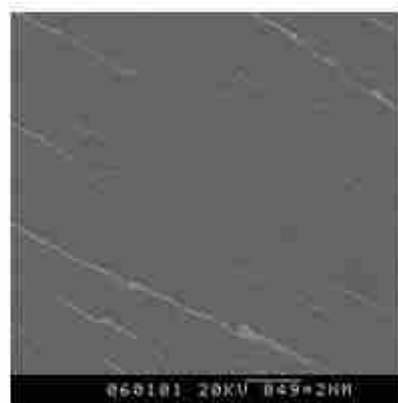
在电工绝缘领域为克服环氧树脂的脆性采取了很多方法，绝大多数采用的是增柔，增柔技术大幅度地降低了树脂绝缘体的耐热性，而抗开裂性增加有限。

环氧树脂合金技术（增韧技术）是大幅度提高环氧树脂绝缘材料抗开裂性的新技术。环氧树脂合金技术与增柔技术不同，不是将材料整体柔性化，而是将环氧树固化物从均相材料变成非均相的多相多组分体系即环氧树脂合金。典型的环氧树脂合金结构是“海岛结构”，见图 3-1。

分散尺寸合适，含量恰当的“海岛结构”一经形成，材料的抗开裂性能变就发生突变，几倍几十倍地增加，而原有的机械性能、耐热性能和电气性能不受损失或损失较小，这样的优异性能，正是人们所期望的。



“海岛结构”的微观形态



一般固化物的微观形态

图 3-1 双酚 A 型环氧树脂/酸酐固化物断口形貌

衡量绝缘材料抗开裂性能的标准—断裂韧性(G_{IC})和冲击韧性

绝缘材料内部不可避免地存在缺陷和微裂纹，应力则在裂纹尖端集中。材料

的开裂总是通过微裂纹的产生，进而扩展实现的。描绘材料抗开裂能力的大小，就是要测量裂纹尖端所能承受的最大外力。

材料的裂纹尖端受力分三种类型：

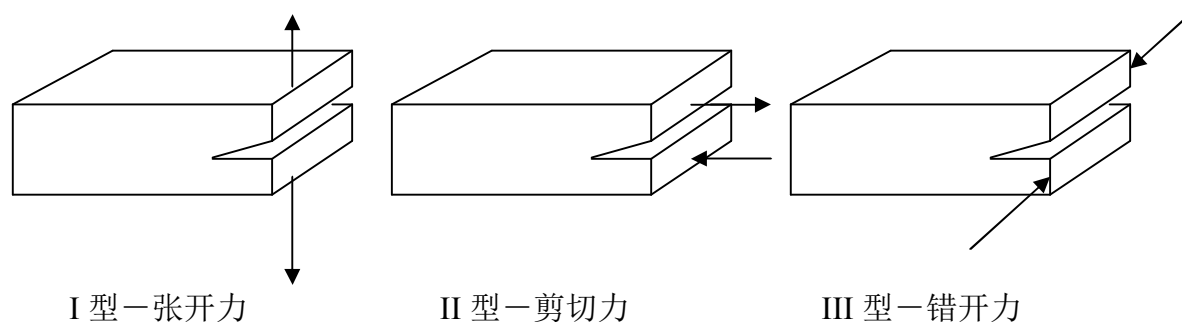


图 3-2 裂纹受力的三种类型

材料裂纹在 I 型受力情况下最容易开裂，断裂韧性(G_{IC})—表示材料裂纹在 I 型受力情况下抵抗裂纹扩展的能力，断裂韧性(G_{IC})和拉伸强度、弯曲强度一样是材料的本性。

断裂韧性(G_{IC})单位是焦耳/米²(J/m²)或牛顿/米(N/m)。

五、高韧性奇士环氧树脂绝缘浇注料的结构特征

1、奇士增韧技术采用的是环氧树脂合金技术

环氧树脂合金技术在航天航空等高科技领域已经成功使用三十多年。环氧树脂合金技术的特点是树脂固化物是多相的，不是均相的。典型的多相结构就是“海岛结构”。

2、形成“海岛结构”的两条技术路线：

一条是添加法：将预先制作好的微米尺寸的橡胶粒子添加到环氧树脂组分中去。

另一条是原位分相生成法：让柔软的微米尺寸的橡胶粒子在环氧树脂的固化过程中，自己长出并均匀分布在环氧树脂固化物中。

金岛奇士公司在清华大学高分子研究所原位分相增韧机理多年研究的基础上，开发出独特的低成本的奇士增韧技术。能原位分相生成“海岛结构”的环氧树脂/酸酐浇注产品自 1990 年就开始在输变电设备制造中得到实际应用。

六、具有“海岛结构”的环氧树脂/酸酐固化物的性能

表 6-1 到表 6-4 分别列出了有代表性的几种环氧树脂绝缘材料增韧改性前后的性能（以下均为室温性能）。

表 6-1 双酚 A 环氧树脂 E39-D/苯酐体系增韧、增柔前后性能

	E-39-D /苯酐 固化物	二丁酯增柔 固化物	奇士合金化的 固化物
模量 $10^3(\text{Mpa})$	4.96	4.66	4.05
冲击强度(KJ/m^2)	1.07	1.11 (+3.7%)	1.57 (+46.7%)
断裂韧性 (J/m^2)	64.6	107.4 (+66.3%)	840.0 (+1200%)
热变形温度 ($^{\circ}\text{C}$)	99.5	65.4 (-34.1 $^{\circ}\text{C}$)	98.6 (-0.9 $^{\circ}\text{C}$)
微观形态	不分相	不分相	海岛结构

固化条件: 120 $^{\circ}\text{C}$ /24hr

表 6-2 双酚 A 环氧树脂 E39-D/甲基四氢苯酐体系增韧、增柔前后性能

	E-39-D/MeTHPA 固化物	加入增柔剂的 固化物	奇士合金化的 固化物
模量 $10^3(\text{Mpa})$	4.56	4.66	3.56
冲击强度(KJ/m^2)	1.21	1.35 (+11.6%)	1.64 (+35.5%)
断裂韧性 (J/m^2)	118.4	184.8 (+56.1%)	1352 (+1042%)
热变形温度 ($^{\circ}\text{C}$)	100	71 (-29 $^{\circ}\text{C}$)	90 (-10 $^{\circ}\text{C}$)
微观形态	不分相	不分相	海岛结构

固化条件: 80 $^{\circ}\text{C}$ /2hr+ 130 $^{\circ}\text{C}$ /4hr

表 6-3 进口环氧树脂浇注料合金化前后的性能

	进口 APG 专用料 固化物	奇士合金化的 固化物
杨氏模量 (Mpa)	4.46×10^3	4.02×10^3
缺口冲击强度(KJ/m^2)	1.32	1.87
断裂韧性 G_{Ic} (J/m^2)	106	1250
热变形温度($^{\circ}\text{C}$)	110	102

固化条件: 170 $^{\circ}\text{C}$ /0.5hr+140 $^{\circ}\text{C}$ /10hr

表 6-4 三种环氧树脂绝缘浇注料电气性能

		国外产品 A	国外产品 B	金岛奇士 产品
击穿强度(kV/mm)		20.8	21.2	20.4
GB1048-7(2mm 板)				
介电损耗(%)	20 $^{\circ}\text{C}$	0.45	0.54	3.8
GB-1409-78	80 $^{\circ}\text{C}$	0.70	0.85	3.57
	120 $^{\circ}\text{C}$	9.72	7.50	4.06
介电常数	20 $^{\circ}\text{C}$	3.36	3.44	3.47
GB-1409-78	80 $^{\circ}\text{C}$	3.46	33.61	4.15
	120 $^{\circ}\text{C}$	5.30	5.89	4.64
体积电阻率($\Omega \cdot \text{cm}$)	20 $^{\circ}\text{C}$	1.53×10^{16}	4.8×10^{16}	5.6×10^{16}
GB-1410-78	80 $^{\circ}\text{C}$	4.03×10^{15}	3.1×10^{15}	1.1×10^{16}
	120 $^{\circ}\text{C}$	3.63×10^{12}	1.4×10^{12}	2.57×10^{13}

固化条件: 80 $^{\circ}\text{C}$ /6hr+130 $^{\circ}\text{C}$ /10hr

西安交大电力设备电气绝缘国家重点实验室测

以上数据告诉我们，环氧树脂合金技术使环氧树脂蕴藏的形变能力得到空前的发挥，大大提高了材料的断裂韧性，这将使材料产生裂纹的可能性变小，并使裂纹不易扩展。而环氧树脂的机械性能、耐热性能和电气性能不损失或损失较小。

此外由于“海岛结构”中分散橡胶粒子的线膨胀系数较大，因而还可以降低环氧树脂固化收缩率，提高制品表面光洁度。

七、金岛奇士环氧树脂合金产品应用实例

1) 互感器制造应用实例

华东某互感器制造公司原来使用环氧树脂/苯酐浇注料，使用奇士韧性固化剂后认为：

- ✓ 可在不增加粘度的条件下增加填料量，工艺性能好；
- ✓ 极大提高了断裂韧性，同时不影响热性能；
- ✓ 浇注产品时模拟了恶劣工作条件，产品冬天放置户外，经受风吹雨打，也未发现开裂现象，其性能是其它增韧剂无法比拟的；
- ✓ 浇注了 LZZQB6-10 电流互感器 100/5A 和 150/5A，都通过了动热稳定实验，其中 100/5A 为首次通过；

东北某互感器厂将原来环氧树脂/液体酸酐体系合金化后，用于制备西北高原地区的大型电流互感器，认为：

- ✓ 产品整机一次通过了条件严格的全套型式试验；
- ✓ 运行过程中经受了线路过电压，过电流冲击，浇注体始终完好无损；
- ✓ 具有“海岛结构”的环氧树脂绝缘材料切合实际，易于掌握，深受欢迎。

2) 开关制造应用实例

华中某开关厂使用进口料 APG 工艺制造新型绝缘套筒，型式试验水压不通过。将进口料进行合金化改造，难题得到顺利解决，详见下表。

表 7-1 开关绝缘套筒的水压试验情况

	进口料制造的 绝缘套筒	合金化后制备的 绝缘套筒
例行实验	通过	通过
0.6Mpa 水压		
2min 不破坏		
型式实验	1.5Mpa	通过
2.0Mpa 水压	0~30 秒破坏	
5min 不破坏		2.4Mpa 破坏

评价：工艺性能好；
耐热性能损失小；
电性能无损失；
价格低，成本增加小；

上海某开关厂使用 APG 工艺制造断路器上出线的环氧帽，铝合金导体形状复杂，环氧绝缘层厚度不均匀，开裂问题严重。使用环氧树脂合金浇注料，开裂问

题得以解决，认为：

- ✓ 增韧效果明显，解决了工厂难以克服的开裂问题；
- ✓ 电性能满足了工厂 10KV 到 35KV 制品的使用要求；
- ✓ 工艺性能良好；
- ✓ 质量稳定，不再因开裂而影响了产品质量；

3) 干式变压器应用实例

沿海某一大型干式变压器厂使用奇士“海岛结构”环氧绝缘料浇注制造 SC-1250KVA/10KV 和 SC9-500KVA/10KV 干式变压器，认为：

- ✓ 工艺性能良好；
- ✓ 体积收缩率低，外观品质良好；
- ✓ 耐机械冲击，韧性好；
- ✓ 变压器出厂检验全部合格，其局部放电测量数据如下：

产品名称：树脂浇铸线圈电力变压器

产品型号：SC-1250kVA/10KV

局部放电测量：

予加电压 17.25KV 时间：30s	视在放电量(PC)		
测量电压：kV 时间：180s	A	B	C
	3.2	3.6	4.0

产品名称：树脂浇铸线圈电力变压器

产品型号：SC-500kVA/10KV

局部放电测量：

予加电压 17.25KV 时间：30s	视在放电量(PC)		
测量电压：12.65kV 时间：180s	A	B	C
	4.4	4.8	4.6

以上产品的 PC 均小于 5

4) 绝缘件制造应用实例

北京某厂用 APG 工艺生产绝缘子，使用了两种环氧树脂材料，弯曲破坏力总不能达到 20KN 的指标，后改用奇士环氧树脂合金。

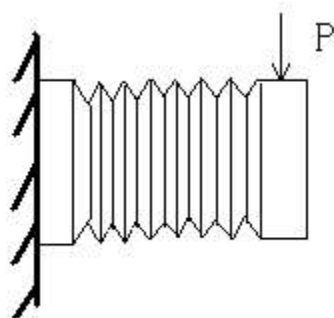


图 7-1 绝缘子弯曲破坏示意图

三种材料制造的绝缘子破坏力分别是：

A 厂环氧树脂料：制作三个试样，弯曲破坏力平均值 17.3KN

B 厂环氧树脂料：制作三个试样，弯曲破坏力平均值 19.5KN

金岛奇士公司合金料：制作六个试样，弯曲破坏力平均值 25.6KN，比 A 料提高了 47.9%，比 B 料提高了 31.3%。同时还通过了-40℃的冷冻实验。

金岛奇士环氧树脂合金材料，能使输变电设备不再开裂，局放降低，动热稳定性试验得以通过的根本原因在于“海岛结构”提高了材料的断裂韧性 G_{IC} 。制造高品质输变电设备，合理的设计、正确的制造工艺和优异的材料三者缺一不可。原位分相的“海岛结构”环氧树脂绝缘材料可使制造厂家不再为开裂、局放等问题困扰，成为制造高性能输变电设备的有力保证。

自 1990 年始，金岛奇士公司的产品经八年的实践考验，于 1998 年，由原机械工业部重大装备司主持鉴定，评价奇士环氧树脂合金系列产品是“既有技术创新，又有经济实用性的高新技术成果”。该成果获 1998 年清华大学重大经济效益成果奖，1999 年北京科技成果进步二等奖。

八、金岛奇士公司耐候环氧树脂绝缘浇注料推入市场

表 8-1 耐候性环氧树脂浇注料性能对比(室温性能)

	进口产品	金岛奇士产品
缺口冲击强度(KJ/m ²)	1.85	2.20
弯曲强度(KJ/m ²)	127	109
拉伸模量 10 ³ (Mpa)	12317	7978
断裂韧性 (J/m ²)	307	1115
热变形温度 (°C)	80.3	86.8
击穿强度 E _B (KV/mm)	24.4	26.2
体积电阻率(10 ¹⁵ Ω cm)	5.0	4.0
介电常数 ε	3.8	3.9
损耗正切 tan δ (×100)	1.3	3.2

固化条件：80℃/6hr+130℃/10hr

电气性能由西安交大电力设备电气绝缘国家重点实验室测

九、金岛奇士公司服务内容

- ✓ 奇士环氧树脂浇注配合料；（户内型和户外型）；
- ✓ 奇士韧性酸酐固化剂；
- ✓ 奇士增韧剂；
- ✓ 协助工厂调整工艺、改进配方。