支持受配电、开关、控制设备组件的材料技术

Materials Technologies Supporting Electric Distribution, Switching and Control Devices

原　永治 HARA, Eiji　　吉泽　利之 YOSHIZAWA, Toshiyuki　　小宅　美晃 OYAKE, Yoshiaki

广泛用于世界很多地区的受配电、开关、控制设备组件，需要应对规定了限制有害于人体和环境的特定有害物质的 RoHS 指令，以及符合 IEC、UL、CCC 等标准。富士电机在 RoHS 指令实施以前就完成了对特定有害物质的替代，现正致力于开发从 2021 年 7 月开始新加入限制对象的邻苯二甲酸酯的替代材料。另外，开发新产品时，由于成功研究出即使形状复杂也不易发生破损、剥落的绝缘涂层材料，再结合生产率出众的加工方法和材料等，不仅实现了产品的小型化和节能化，还达到了品质和性能要求。

Electric distribution, switching and control devices, used in various regions of the world, are required to conform to the RoHS Directive, which restricts the use of specific hazardous substances that are harmful to the body and the environment, as well as other standards such as IEC, UL and CCC. Fuji Electric completed its substitution of specified hazardous materials before the effective date of the RoHS Directive. We are working to develop an alternative material for phthalic ester, which will have its usage restricted starting in July 2021. Furthermore, we have developed insulating coating materials that are less susceptible to cracking and peeling even when used in the complex shapes and have combined materials with processing methods that improve productivity. This allowed our new products to be compact, save energy, and meet quality and performance requirements.

1　引言

受配电、开关、控制设备组件的产品被用于世界各个地区，因此，必须应对国际化的要求。2003 年生效的 RoHS 指令〈注〉限制了在制造阶段使用特定有害物质，以防止对环境和人体有害的化学物质暴露在自然环境中。富士电机在使用受配电、开关、控制设备组件的所有产业领域中，根据 RoHS 指令的实施时期，有计划地采取了应对措施。并且，在确保符合 IEC、UL、CCC 等各标准的同时，还必须应对节能化、结构紧凑化的要求。

本文将就应对近年来各标准的环境规定而开发的材料技术，和为产品小型化做贡献的材料技术进行介绍。

2　应对环境规定的材料技术

2.1　环境规定的动向

近年来，要求限制化学物质的含有浓度，减少产品中的有害化学物质含有浓度。作为事例之一，**图 1** 中展示了 RoHS 指令的时间表和富士电机的应对措施。

2006 年 7 月实施的 RoHS 指令将电压范围 AC1000 V 和 DC1500 V 以内使用的电气电子设备分为 10 类，要求将 6 种特定有害物质的含有浓度控制在极低的指定值以下。6 种特定有害物质为铅 (Pb)、汞 (Hg)、镉 (Cd)、六价铬 (Cr^{6+})、多溴联苯 (PBB)、多溴二苯醚 (PBDE)。

受配电、开关、控制设备组件属于分类 9，原本被规定

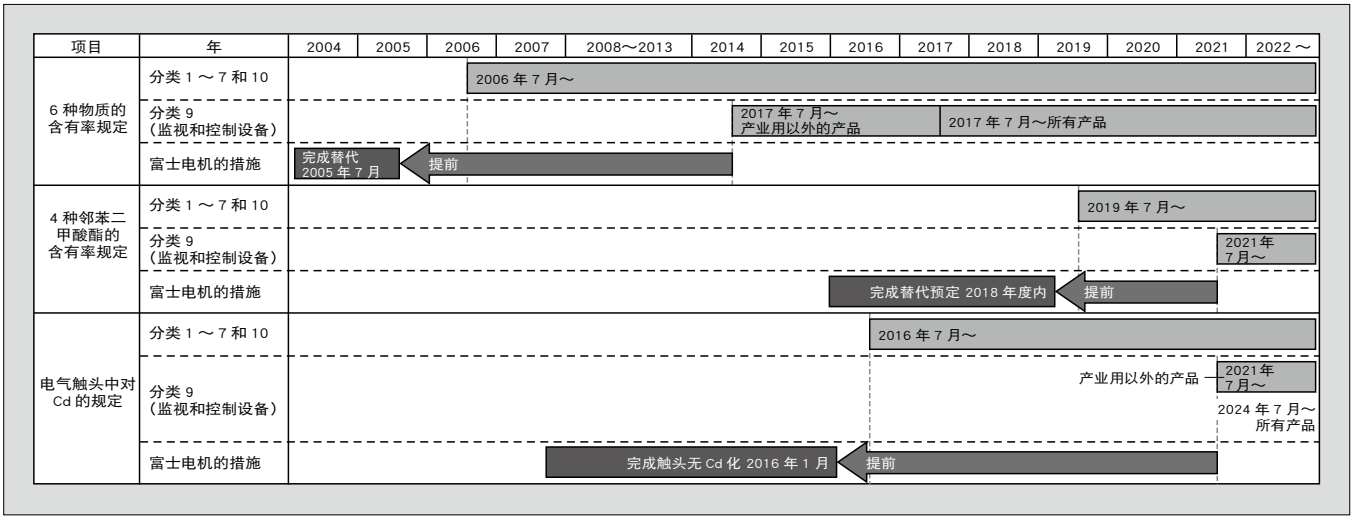

图 1　RoHS 指令的时间表和富士电机的措施

〈注〉RoHS 指令：关于电气电子设备中限制使用特定有害物质的 EU（欧盟）指令

表 1　使用邻苯二甲酸酯的可能性

4 种邻苯二甲酸酯	电线（PVC）	橡胶（NBR、CR、CSM）	涂料、粘合剂、浇注树脂
DEHP	○	○	△
BBP	×	×	×
DBP	×	×	△
DIBP	×	×	×

○：可能性大，△：可能性小，×：无可能性

为对象外，但根据 2011 年 7 月的修订版 RoHS 指令，从 2014 年 7 月开始成为适用对象。

2015 年 6 月，由于可能会引发体内的激素作用，或妨碍激素作用，针对所有分类产品，将 4 种邻苯二甲酸酯新追加到了限制物质中。分类 1～7 以及 10 从 2019 年 7 月开始，分类 9 从 2021 年 7 月开始，要求将含有浓度控制在 1000 ppm 以下。这 4 种限制物质是邻苯二甲酸二（2-乙基己基）酯（DEHP）、邻苯二甲酸丁苄酯（BBP）、邻苯二甲酸二丁酯（DBP）、邻苯二甲酸二异丁酯（DIBP）。

另外，邻苯二甲酸酯多被用作电线、橡胶、浇注树脂等的增塑剂（**表 1**）。

此外，关于对象外的电气触头中的 Cd，分类 1～7 和 10 到 2016 年 7 月，产业用以外的分类 9 到 2021 年 7 月（产业用到 2024 年 7 月），对象外有效期将结束。为此，富士电机推进了触头中 Cd 的替代技术开发，在 2016 年 1 月完成了无 Cd 触头的转换。

2．2　邻苯二甲酸酯的替代材料技术

富士电机已经完成了部材中是否使用了邻苯二甲酸酯的确认，在规定生效前就开始采取了替代 4 种邻苯二甲酸酯的措施。邻苯二甲酸酯的主要目的如**表 2** 所示，作为增塑剂添加于橡胶（NBR 等）零部件、电线被覆等氯乙烯（PVC）中，从而增加橡胶弹性（可挠性），此外还如下所示，具备提升性质水平的作用。

(a)　与原料素材的相容性好（抑制分离）
(b)　提升加工性（流动性、低熔点）
(c)　环境性能（耐热性、耐寒性）
(d)　电气绝缘性

在更换材料之际将依次实施以下步骤：变更增塑剂和橡胶种类，选择替代材料；对缓冲特性、温度特性、耐劣化性等产品要求的性能进行定量评价。预定于 2018 年度内，在对象产品中彻底不再使用邻苯二甲酸酯。

表 2　NBR 橡胶中邻苯二甲酸酯的配比

种类	配比（wt%）
原料橡胶	46
加强材料（炭黑）	23
填充剂（碳酸钙）	23
增塑剂（邻苯二甲酸酯 DEHP）	5
其他（硫化剂等）	3

3　贡献于小型化的材料技术

3．1　电子式漏电断路器“EX 系列”用涂层材料

(1)　背景

“EX 系列”采用和塑壳式断路器相同的外形尺寸，设置面积比旧型产品缩小了 30%，实现小型化。因此，如**图 2** 所示，除了导体形状更加复杂，还要求绝缘膜更薄（0.4 mm）。而且，为确保应对端子拧紧时发生的应力可挠性，针对产品异常过热和火灾耐性，要求采用具备阻燃性（自熄性）等特性的绝缘包覆（涂层材料）。

对形状复杂的导体使用绝缘包覆时，发现市售材料中还没有满足**表 3** 所示所有要求值的粉末环氧涂层材料。因此，富士电机开发了一种新材料，其可满足杯突试验中的压痕深度和热循环性等性能要求。

(2)　提升材料的可挠性

如**图 3** 所示，若将螺丝拧紧到导体端子上，绝缘涂层部会发生很大的应力。这种应力可能导致绝缘涂层破损或剥落等，因此，要求绝缘涂层材料具备比市售材料更加出众的可挠性。

于是，富士电机在材料开发时与材料制造商合作，对变更分子结构和使用有机添加剂进行了探讨，并成功提升了可挠性。

可挠性的评价指标有伸长率、弹性率以及杯突试验中的压痕深度。此次，富士电机决定通过可展示与产品端子拧紧破坏力矩值相关性的杯突试验（**图 4**）来确认改善效果。**图 5** 中展示了杯突试验后的样品。市售材料的压痕深度低于要求

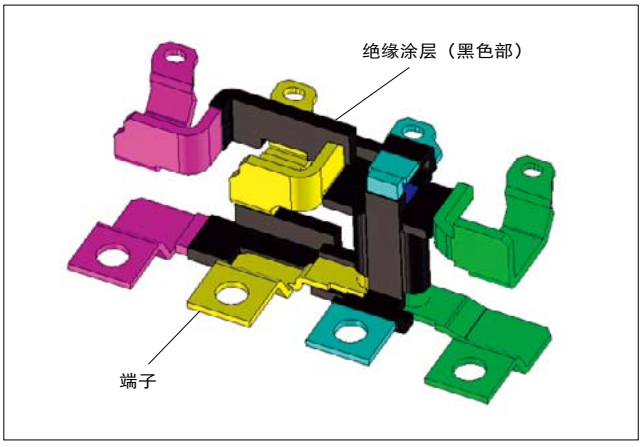

图 2　EX250 导体结构和绝缘涂层部

表 3　产品要求的性能

项目	要求值	市售材料
耐压（0.4 mm）	12 kV 以上	17.8 kV
耐电痕值	175 V 以上	200 V
杯突试验 *	7 mm 以上	1 mm
剪切接合强度	20 MPa 以上	13 MPa
阻燃性（自熄性）	有	有
热循环性	应不开裂	产生开裂

* 杯突试验中的压痕深度

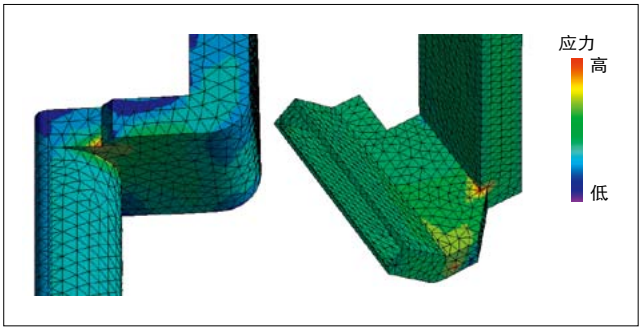

图 3　端子拧紧时发生的应力分析结果例

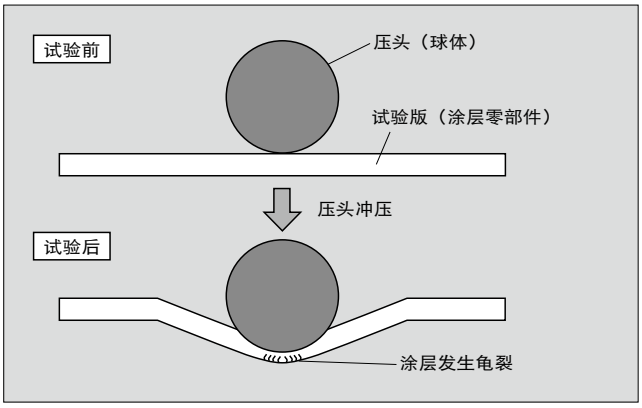

图 4　杯突试验

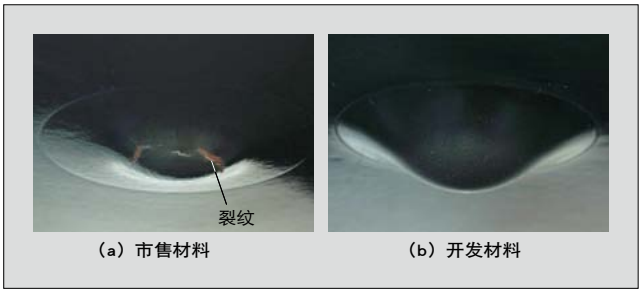

图 5　杯突试验后的样品

值，产生了裂纹，但开发材料通过改良可挠性，达到了杯突试验的目标，同时满足产品所需的螺丝拧紧性能。

⑶　确立长期可靠性

为保证涂层部的长期可靠性，需要能承受相当于 20 年的热循环。**图 6** 中展示了不同开发材料和表面处理方法得到的热循环试验结果。开发材料 2 在开发材料 1 的基础上优化了无机填充材料（添加量、粒子），使线膨胀系数比市售材料小了约 30%，接近导体（金属）的线膨胀系数。另外，由于涂层材料和配合使用的材料间的接合强度对绝缘被覆部的开裂有显著的影响，因此为改善接合力，探讨了多种表面处理方法。通过将其中效果最明显的表面处理和开发材料 2 结合起来，确保了绝缘涂层的长期可靠性。

3. 2　12 kV、24 kV VCB 的绝缘材料技术

⑴　背景

高压真空断路器（VCB）必须要应对全球市场的要求即满足 IEC 标准，以及小型化和提升安全性的要求。但过去

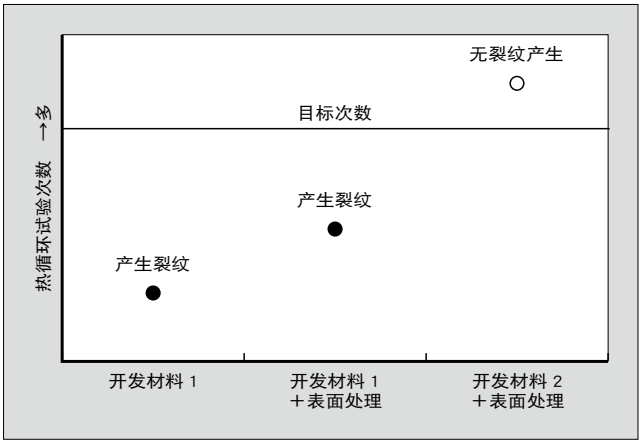

图 6　热循环试验的结果

的高压设备，采用以热固性树脂的环氧树脂真空浇注品和 BMC（Bulk Molding Compound）成形品作为绝缘材料的空气绝缘结构。要满足 BMC 外壳的绝缘性能，必须确保规定的空间距离，小型化受到限制。

⑵　极柱自动加压凝胶的成形加工

在开发新产品 24 kV VCB 时，因为不仅要应对 IEC 标准，还要实现小型化，因此采用了以环氧树脂作为绝缘材料，包覆主电路分断部的固体绝缘方式。由此，实现了容积比旧型产品缩小 40% 的小型化。另外，过去的环氧真空浇注，固化需要 12 个小时以上，成为生产上的瓶颈。因此，富士电机选择生产率出众的自动加压凝胶化法作为环氧树脂的成形方法，从而可迅速应对订单的增加（**表 4**）。

环氧树脂在成形时会因为固化而体积收缩，成形后冷却时也会收缩，因此选择了线膨胀系数较小的树脂（**表 5**）。另外，**图 7** 所示，真空阀受环氧树脂收缩影响，陶瓷绝缘管破损、与树脂发生界面剥离。因此，富士电机用硅橡胶包覆真空阀，缓和了对陶瓷绝缘管的应力。

⑶　高压绝缘零部件的评价技术

富士电机在产品开发时，初期阶段通过性能评价确保品质，并通过最终阶段的量产评价保障稳定制造。

表 4　高压绝缘材料和成形加工方法

材料	成形方法		耐压性能	生产率
环氧树脂	真空浇注	材料注入 / 真空槽 / 模具 / 环氧树脂	30 kV 以上	1～2 个/天
	自动加压凝胶化法	浇注罐 / 真空消泡 / 加压 / 材料（液体） / 模具 / 开关	20～30 kV	10～15 个/天
BMC 环氧树脂	压缩成形	模具 / 压力 / 材料（片剂）	10～20 kV	30～40 个/天

表 5　固体绝缘用环氧树脂的要求特性和选材特性

特性	要求	测定值
弯曲强度	100 MPa 以上	133 MPa
高温强度（60 ℃）	80 MPa 以上	99 MPa
线膨胀系数	10～40 ppm/K	30 ppm/K
耐压	15 kV/mm 以上	20 kV/mm

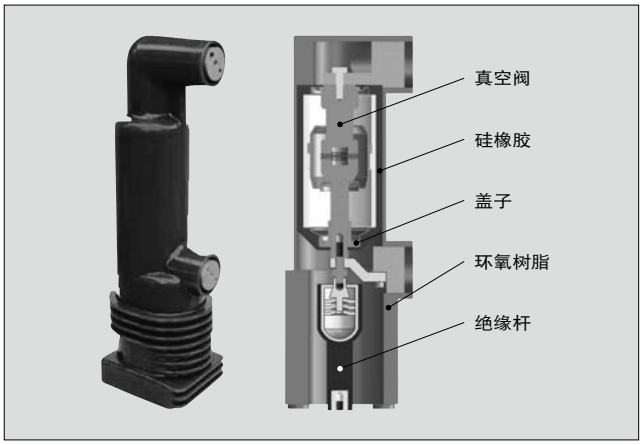

图 7　24 kV VCB 的极柱结构

高压绝缘零部件的评价实施机械强度试验、电气工频耐压试验、雷电冲击耐压试验。另外，通过预想市场环境，对高温下的特性进行调查，和预想长期使用后的劣化评价（加热、加湿、热循环试验），进行性能验证。

并且，为进行零部件单品的性能调查，绝缘零部件内部的观察使用 X 射线透射系统和 X 射线 CT，进行内部缺陷（气泡、龟裂）和功能异常部的非破坏性检查（**图 8**）。

⑷　衬套零部件的 BMC 成形加工

12 kV VCB 用衬套零部件过去采用的是环氧真空浇注材料，富士电机将材料变更为 BMC，通过压缩成形提升了生产率。

图 8　极柱的 X 射线透射照片

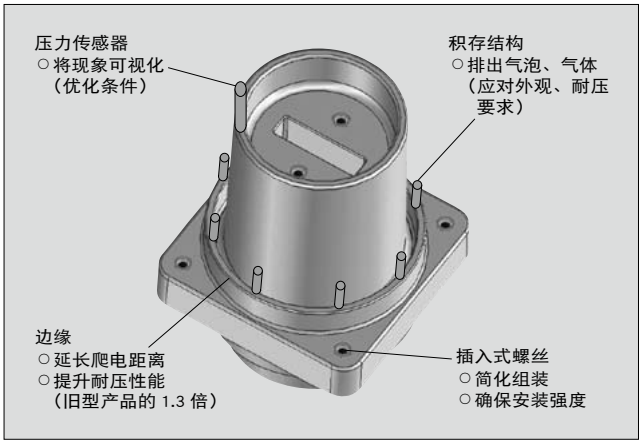

图 9　12 kV VCB 用衬套的改善内容

要减少高压绝缘零部件耐压性能的不稳定性，结构和模具的优化不可或缺。因此，富士电机采取了**图 9** 所示的对策，同时在模具内部设置了压力传感器，定量把握成形时内部的变化，使发生的外观不良和内部状态可视化，确保了耐压性能，实现了外观品质的稳定。

4　后记

本文对支持受配电、开关、控制设备组件的材料技术进行了介绍。

今后，富士电机将继续开展应对环境规定的工作，并推进有助于新产品的节能和小型化的新材料开发，提供可满足客户需求的产品，为保护社会环境做贡献。

原　　永治

从事受配电、开关、控制设备组件树脂材料的研发。现为富士电机机器制御株式会社开发本部技术开发部课长助理。

吉泽　利之

从事受配电、开关、控制设备组件树脂材料的研发。现为富士电机机器制御株式会社开发本部技术开发部主任。

小宅　美晃

从事受配电、开关、控制设备组件树脂材料的研发。现就职于富士电机机器制御株式会社开发本部技术开发部。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。