

电气绝缘系统的安全性和性能可靠性



综述



安全性和性能可靠性是电动机、变压器、发电机和螺线管等电磁设备十分重要的属性，电气绝缘系统是电磁设备的重要组成部分。电磁设备里，电气绝缘材料采用独特方式紧密组合在一起，构成电气绝缘系统，并在不高于该设备最高工作温度的条件下运行。比如，电磁线、对地绝缘和绕组间绝缘、浸渍树脂组合构成了变压器的绝缘系统。

在高温下运行时，电磁设备的电气绝缘材料可能发生热老化降解；而电磁设备性能可靠性很大程度上取决于电气绝缘材料间的兼容性以及电气绝缘材料组成一个系统的相互作用。实际上，高分子材料的热性能并非单种材料耐热等级的简单叠加，所以对应用在设备上构成系统的所用材料组合进行热性能评定就至关重要。

本 UL 白皮书介绍了电气绝缘系统试验的发展历程、开发原因，并概括了试验方案，以及探讨适用于电气绝缘系统的技术因素。本书列出了 ANSI/CAN/UL 1446《绝缘材料系统安全性标准》的要点，进行完整热老化试验的要求，关于针对现有热老化电气绝缘系统调整方法的探讨，以及对于 OEM 制造商将电气绝缘材料供应商创建的电气绝缘系统整合到其成品中的一些考虑因素。

发展历程

第二次世界大战以后，美国海军有意更新军舰上的电动机。当时高分子材料制成的新型绝缘材料面世，宣称材料热性能优异。对此，海军需与已经使用了多年经受考验的电动机绝缘材料对比，验证新材料的宣传是否属实。海军为此组建了团队，探索绝缘系统热特性的评定方法。

就此，团队制定了采用代表模型评定绝缘材料组合的方法。¹该模型最初称为“绝缘寿命试验模型”(motorette)，而今天该设计被称为“通用模型”(GPM)。该方法测定绝缘系统的耐热等级的时间长度远少于实际电动机试验达到使用寿命终点所需的时间。

后续研究²确认材料组合的热老化反应不同于类似材料单独使用时的热老化反应。在《军用规范 MIL-E-917D (海军)》中，进一步说明了这些试验结果，该规范涵盖了海军船用电力设备的基本要求：

“适合某一特定温度的材料，如果采用绝缘系统试验程序，可能会发现该材料适合另一更高或更低的温度。”
(3.5.2.1.10)³

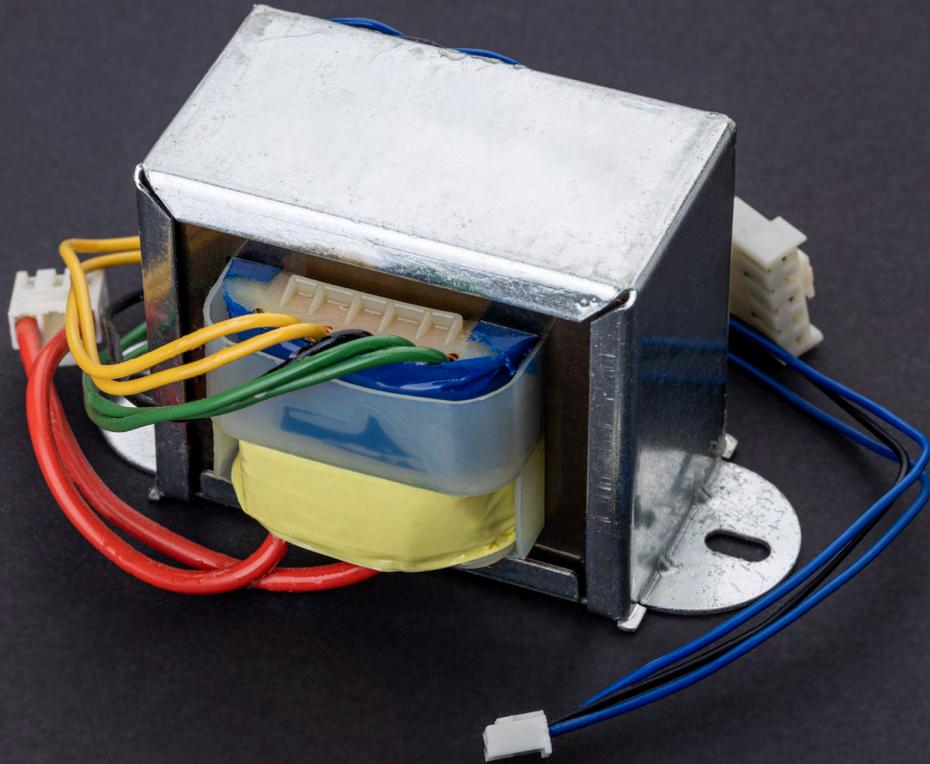


根据这一材料性能,需对电气绝缘系统开展完整热老化试验,验证这些电气绝缘材料组合可以稳定工作的温度。

基于这项试验工作,发布了 IEEE 117-1974 标准《不规则缠绕交流电机绝缘材料系统的评定试验程序》,该标准概括了电动机模型的组装和热老化试验方法。1978 年 6 月,发布了 UL 1446 标准《绝缘材料系统安全性标准 - 通用》。因此,根据 UL 的产品类别号 OBJY2 下,按照要求对电气绝缘系统进行了认证。

近期一项研究⁴佐证了评估电气绝缘材料组合的重要性,该研究比较了完整电气绝缘系统中材料组合试验计算出的耐热等级和根据电气绝缘材料一般等级(即最低)确定的单独电气绝缘材料耐热等级。在此评定中有 30 套电气绝缘系统接受了考核,根据整套电气绝缘系统的试验结果,有 15 套(50%)电气绝缘系统耐热等级较高,而有 14 套(47%)电气绝缘系统耐热等级较低。这类研究结果佐证了对电气设备中使用的材料组合进行完整热老化试验程序的重要性。





绝缘和电气绝缘系统 (EIS)

电气绝缘材料可用于所有类型的带电设备。这些材料隔离电能来源，并使得所需电流沿合理设计的电路流动这对于设备安全运行绝对是至关重要的，同时降低了财产意外损失和操作人员意外受伤的可能性。如果绝缘失效，而电流流向其他电位、接地金属或不带电金属，导致材料失效引发火灾或触电，则人身伤害和财产损失的风险大幅上升。

即使在预期使用条件下，随着时间的推移，承受正常电负荷的电气绝缘材料也可能因材料老化而丧失绝缘效果。虽然导致绝缘材料老化的原因有很多，但最常见的还是电路或环境温度过高导致的内部发热从而引发热老化。热老化会降低电气设备预期设计性能进而可能发生触电、火灾或爆炸等事故，影响设备的安全性能。

为了减轻这些影响，降低总体安全风险，电气设备开发设计人员应该在电动机、线圈或变压器中整体采用通过了热老化试验的电气绝缘系统。电气绝缘系统的已知耐热等级是将电气绝缘材料组合作为一个整体进行试验确定的，因而电气设备采用通过了热老化试验的电气绝缘系统，使用寿命更长，安全风险更低。

关于 UL 1446

ANSI/CAN/UL 1446 是加拿大和美国共同制定的国家标准，规定了以热因素为材料老化的主要诱因的电气绝缘系统的试验要求。标准还涵盖了通过了热老化试验的电气绝缘系统所用漆包线和浸渍漆的热评定要求。目前第 8 版 UL 1446 已被绝缘材料和绝缘系统领域的多项国际标准所采纳，如下：

- IEC 62114,《电气绝缘结构 —— 热分级》
- IEC 60505,《电气绝缘系统的评定与鉴别》
- IEC 61857,《电气绝缘系统 —— 热评定规程 第 1 部分: 通用要求 —— 低压》
- IEC 61857-21,《电气绝缘系统 —— 热评定规程 第 21 部分: 通用模型的特殊要求 —— 散绕组应用》
- IEC 61858,《电气绝缘系统 —— 对已确定等级的散绕组电气绝缘系统进行组分调整的热评定方法》

由 UL 1446 提出的试验方法，使其成了评估电气绝缘系统安全性和性能的最佳标准。同样重要的是，经过试验发现符合 UL 1446 要求的电气绝缘系统能满足电磁设备认证要求，从而可加快电磁设备认证进程。



图1: 通用模型

按照 UL 1446 进行试验和认证

UL 1446 适用于承受 105°C 以上工作温度的电气设备和元件中所用的电气绝缘系统。电气绝缘系统按照标准试验之后, UL 认证为下列两类之一:

- **电气绝缘系统 (OBJY2)** — 本类适用于电磁设备制造商采用元件独特组合制作或组装的整套电气绝缘系统。
- **电气绝缘系统元件 (OBJS2)** — 本类适用于电气绝缘材料制造商组建的整套电气绝缘系统, 制造商通常是可成型树脂、绝缘薄片、浸渍漆等制造商。

组建电气绝缘系统首先要确定设备所用材料的功能。实际上, 组建工作从两个最重要的零部件开始, 即绕组线和电气绝缘材料 (也称“重要元件”)。绕组线可以是漆包电磁线、裸露金属 (外包绕绝缘薄膜或胶带), 也可采用包括浸渍树脂在内的材料组合。电气绝缘材料可以是绝缘薄膜、成型树脂、环氧粉末涂料、浸渍树脂等。

电气绝缘材料主要用于在不同电位之间或者接地或不带电金属之间建立绝缘介质。其他各种用于机械支撑或结构的非金属材料, 以及并非用于提供电气保护的各种非金属材料均视为非电气绝缘材料(NIM, 也称“次要元件”)。

在确定哪些材料是电气绝缘材料, 哪些材料是非电气绝缘材料之后, 需要确定试验时哪种材料配置组合。试验对象可能是实际的设备本身, 也可能是设备的代表模型。代表模型或通用模型用于在单个试验方案中评定一种或更多种电气绝缘材料。

按照 UL 1446 进行试验和认证

采用通用模型可以试验用作对电气绝缘材料不同种类的电磁线、绝缘薄膜、成型树脂等等。如果考虑生产中使用多个供应商采购材料，采用通用模型认证较有优势。例如，多种不同等级的尼龙成型树脂可以采用同一个通用模型试验，便于实际应用中灵活采购用于一个生产流程的材料。

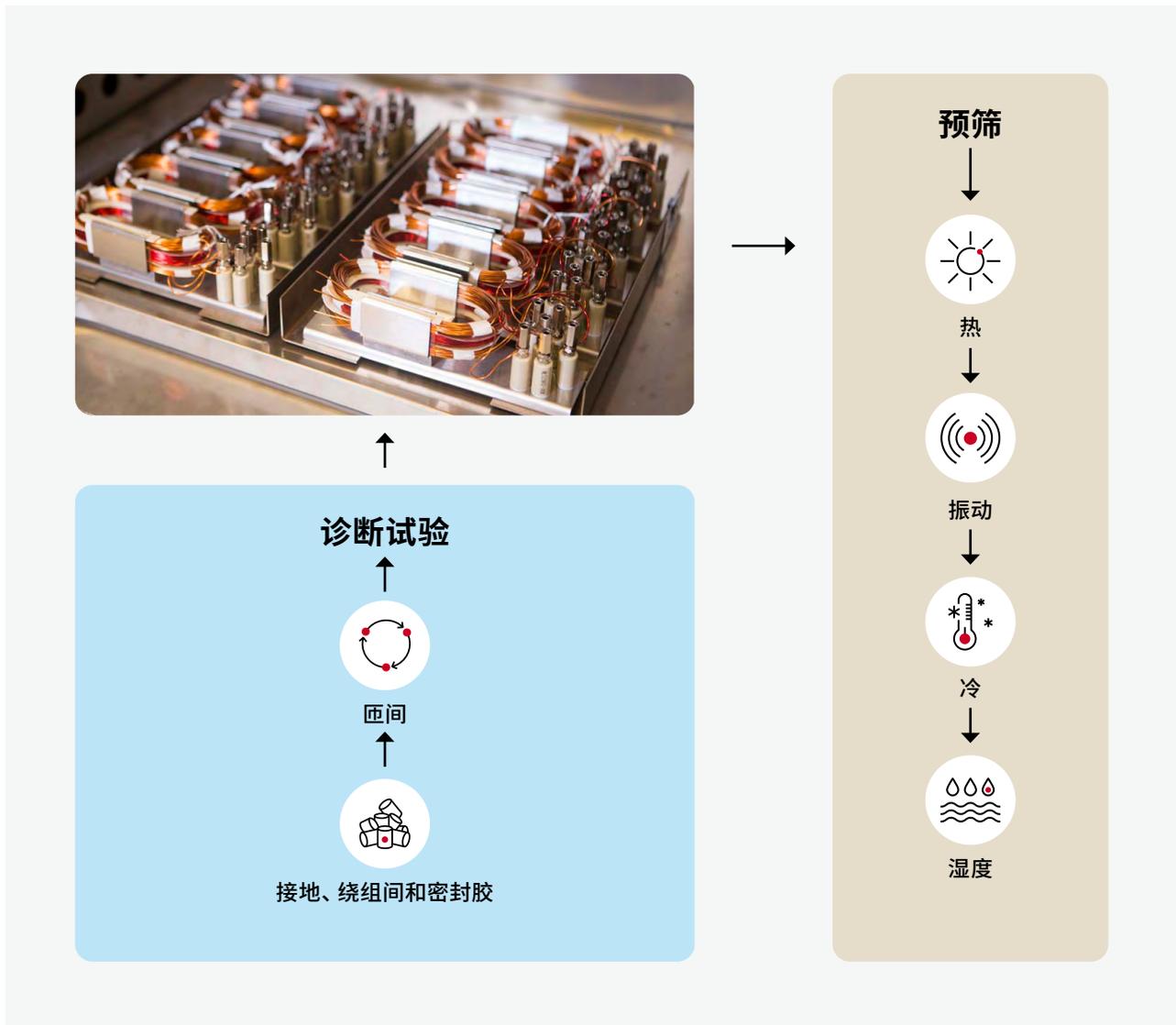


图2: 完整热老化试验周期

下一步要确定试验时间和温度。为此，认识到完整热老化试验的一个“基准电气绝缘系统”（即经过评定并确认了耐热等级的已有的电气绝缘系统）和要在 3 个或 3 个高温点以上考评的待评电气绝缘系统的老化试验非常重要。每完成一个热老化周期，每个通用模型需承受机械应力、低温冲击和潮湿暴露，随后接受介电耐电压诊断试验。

按照 UL 1446 进行试验和认证

试验完成之后，比较待评电气绝缘系统和基准电气绝缘系统的结果，评定过程要计算斜率和斜线截距。该计算结果为绝缘系统分级，表示为如下相对温度指数 (RTI) 等级：

系统等级	最高热点——摄氏温度°C
120 (E)	120
130 (B)	130
155 (F)	155
180 (H)	180
200 (N)	200
220 (R)	220
240 (S)	240
240 (C)以上	240以上

图3: 绝缘系统相对温度指数等级

对于待评电气绝缘系统，会根据使用该电气绝缘系统的设备在短期试验数据，表明该设备在何种温度级别下运行，以及该设备中最热的温度点。然后采用该温度等级确定待评电气绝缘系统试验的高温温度。例如，一个设备在热温升测试中获得 148°C，那该设备需要等级为 155(F) 的电气绝缘系统。

在电气绝缘系统热老化时，先选择不高于额定温度 20°C (本例中为 175°C) 以上的最低老化温度，然后选择两个更高的温度，最低老化温度和最高老化温度相差不超过 40°C。最后，为每一个老化温度选一个热老化周期时间。最低老化温度时，选择周期时间最长；最高老化温度时，选择周期时间最短。

确定了试验模型和试验方案后，就可以开始电气绝缘系统的完整热老化试验。如一个通用模型未通过介电耐电压试验时，则记录试验的时间。如在同一个温度点的所有试样均未通过介电耐电压试验，可以计算该温度条件的所有试样的对数平均时间。最低老化温度条件下，对数平均时间至少须有 5000 小时；而最高老化温度条件下，对数平均时间至少须有 100 小时。

按照 UL 1446 进行试验和认证

如基准电气绝缘系统和待评电气绝缘系统的所有通用模型均被耐压击穿，则基准电气绝缘系统和待评电气绝缘系统的时间值可拟合为一条斜线表示。通过基准电气绝缘系统的绝缘等级温度线与基准电气绝缘系统的斜线交点的线为基准电气绝缘系统的相关时间，待评电气绝缘系统的温度等级则根据待评电气绝缘系统斜线与基准电气绝缘系统的相关时间电气绝缘系统交点确定。该斜线被称为绝缘系统寿命直线。

确定电气绝缘系统的温度等级

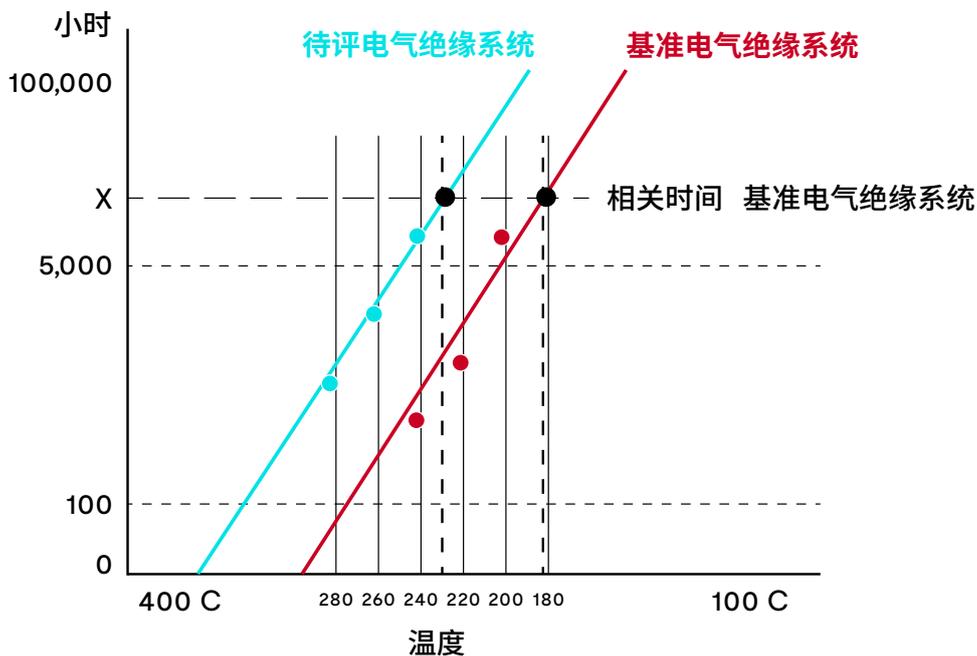


图4: 绝缘系统寿命直线分析

调整通过 UL 1446 认证的电气绝缘系统

由于最低试验温度至少需要老化 5000 小时，全新电气绝缘系统的试验可能至少耗时一年。不过，该方法的优点是电气绝缘系统耐温等级和它的材料独特组合为已知量。这一点很重要，确保了寿命期内设备在额定温度的性能符合预期。电气绝缘系统获得了 UL 认证，即证明这些绝缘材料组合适合预期温度的用途。

UL 1446 还允许在一定条件下调整已认证的电气绝缘系统。这一点非常重要，因为制造商往往希望在已认证的电气绝缘系统中加入新的非电气绝缘材料元件或者替代的非电气绝缘材料元件，比如胶带、绑扎带、软套管、灌注复合物、平衡复合物及其他机械用途非金属材料。采用称为密封管元件兼容性试验 (CCT) 的技术，不要求制造商再进行一次完整热老化试验来评定补充元件，可以直接评估补充元件与目前电气绝缘系统所用绕组线的化学兼容性。

开展密封管化学相容性试验时，整套系统的代表样品要在密封环境和该系统额定温度 +25°C 的条件下进行两周的老化。试验中，需在一根管子（“基准管”）中装入已经进行原始热老化试验的材料。另一根管子（“替代元件管”）除了装入与基准管相同的材料，还须装入补充元件。两根管子分别都要加入 10 根漆包线绞线对。经过了为期两周的老化，两根管子的漆包线绞线对接受介电击穿强度试验。比较替代元件管所取样品的平均介电击穿数据和基准管所取样品的数据，确定替代元件管的绞线对是否退化，退化则表明样品的介电强度降低。

如果替代元件管至少 50% 的样品介电强度保持不变，则补充元件可以用于目前已认可的电气绝缘系统。此试验可以快速判断所有电气绝缘系统材料的挥发气体副产品是否会危害电气绝缘系统的绕组匝间绝缘。

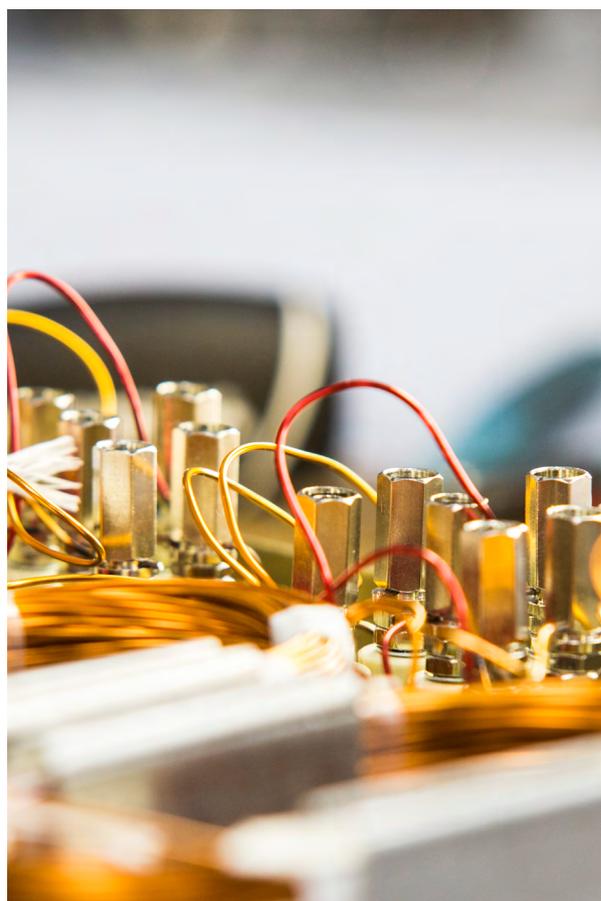
采用已认证的绝缘系统

电气设备制造商如果希望在产品中使用经过试验、具有已认证耐热等级的电气绝缘系统，除了以上方案外，还有一种方案可以更快达到符合相关安全标准和法规要求的目的。众多电气绝缘材料零部件供应商已经开展了热老化试验和密封管元件相容性试验，组建了符合 UL OBJS2 类型的电气绝缘系统，确定了电气绝缘系统的耐热等级。OEM 制造商可采用这些已符合要求的电气绝缘系统到 UL OBJY2 的认证中。

UL 拥有一套全面的数据库（见 <http://iq.UL.com/systems>）允许有关各方可以在数据库中检索 UL 1446 标准认证过的产品类别 OBJS2 的电气绝缘系统。这些电气绝缘系统已经被绝缘薄膜、浸渍漆或线圈骨架材料制造商等电气绝缘材料供应商评定。这些绝缘材料供应商为了提供“现成的”电气绝缘系统，开展了试验流程，耗费了时间和费用。所以 OEM 制造商如果发现某一已认证的 OBJS2 电气绝缘系统满足自己的应用要求，那么直接采用该电气绝缘系统建立 OBJY2 认证会更加经济高效。

未做任何改动而直接采用的电气绝缘系统无需进一步试验。如果需要调整或者增加非电气绝缘材料元件，那么密封管元件相容性试验并足以证明遵从性。当然，如果在采用的绝缘系统上改变或者调整电气绝缘材料，那么必须开展完整热老化试验。

OEM 制造商如果需求将认证为 OBJS2 的电气绝缘系统认证采用为 OBJY2，则应该告知 UL 自己希望采用的已认证电气绝缘系统及预期用途。此外，OEM 制造商可能需要经 OBJS2 认证的电气绝缘系统所有者出具的授权函，那么在需要开展密封管元件相容性试验的情况下，UL 可以依法公布与原已认证的电气绝缘系统有关的专有信息。



适合制造商的其他认证方案

某些情况下，如果制造商的电气绝缘系统正在进行完整热老化试验，制造商可能要求获得对该系统的临时认证授权。如果热老化试验已经进行了大约 2000 个小时，而且两个或两个以上温度点生成的数据与制造商期望的耐热等级一致，则可以给予临时认证授权。电气绝缘系统的临时认证是暂时性的，并可能变动；在完成完整热老化试验之后，按照临时认证确定的耐热等级可能提高，也可能降低。

最后，如前文所述，UL 1446 提出的绝缘系统试验方法已在多个国际标准中广泛采用，现行版本 IEC 61857 和 IEC 61858 的试验要求与 UL 1446 的要求几乎完全相同。从而，如果表明试验符合 UL 1446 的要求，也可以证明同时符合相关 IEC 标准并生成试验报告，无需重复热老化试验。因此，UL 1446 已认证的绝缘系统就可以借助国际电工委员会电工产品合格测试与认证组织 (IECEE) 的 CB 体系认证畅通无阻地进入全球市场。比如，IECEE 检测实验室委员会决议 DSH-2074 允许使用按照 UL 1446 评定、归为 UL OBJY2 或 OBJS2 的电气绝缘系统。⁵



总结和结论

目前仍然有部分机构单纯使用单独电气绝缘材料元件的耐热等级来确定电气绝缘系统的耐热等级，即使用电气绝缘系统中评级最低材料的等级作为该电气绝缘系统的耐热等级。遗憾的是，该做法是不适用的，即不同类型的电气绝缘材料放在一起，直接接触，高温下可能会发生化学反应。随着时间推移，高温引起的化学反应可能导致电气绝缘材料绝缘性能下降，而与个别的绝缘材料耐热等级不一致。材料性能下降，电气绝缘系统完整性也会受损，可能导致整个绝缘系统性能下降，设备安全相关的危害风险也会增加。

UL 1446 提出的用于试验电气绝缘系统所用材料特定组合的热老化试验方法帮助确认了单独电气绝缘材料之间发生独特化学作用的可能性，化学作用可能加速材料老化，而电气绝缘系统的整体性能也可能受损。这种系统性和整体性的试验方法有助于提升对电气绝缘系统和电气设备长期安全性和性能的整体信心。

UL 是制定和应用适用于电气绝缘系统标准的先锋，提供了丰富的试验和认证服务，涵盖各种电气绝缘系统和零部件。

如欲进一步了解 UL 的电气绝缘系统服务，敬请访问 [UL.com/EIS](https://www.ul.com/EIS)。

参考文献

1. 《散绕绕组模型绝缘系统的功能评定》，Brancato、Johnson、Campbell & Walker、Electrical Manufacturing, 1959年3月。
2. 本研究已解密的结果最终公布于《电气绝缘的可靠预测研究：海军总结报告》，Brancato, Johnson, Campbell & Walker,U.S.Naval Research Lab, Washington, D.C., 1977年7月网页.2016年4月4日
3. MIL-E-917D,《军用规范：电力设备基本要求》，1965年1月。
4. 《材料耐热等级和电气绝缘系统耐热等级》，Eltek International Laboratories, 2015年5月22日.网页.2016年4月4日
5. IECCE CTL. https://decisions.iecee.org/iecee/SearchCMC.nsf/de_h.xsp?v=ct!



ULSolutions.com.cn

UL Solutions 和 UL Solutions 标识是 UL LLC 的商标，版权所有 © 2023。未经允许不得复制或分发本白皮书。本白皮书仅提供基本信息，不具备法律或其他专业建议。