

Time-Window Study on the Gelation/Curing Process of Dry-Type Transformer Epoxy Resin Casting Coils and Process Optimization

Xiao Han Gang Wei Xiansheng Wang

Beijing Creative Distribution Automation Co., Ltd., Beijing, 101400, China

Abstract

Localized resin slump at the upper end of the terminal plate side of dry-type transformer epoxy resin casting coils is a common defect during the curing process, adversely affecting product aesthetics and insulation reliability. This is primarily caused by volumetric shrinkage during the resin's gelation phase. This paper designs and implements a finely-tuned stepwise heating curing process to empirically observe and record the viscosity-time relationship of the resin during the critical 80°C gelation stage. The experiment successfully captured the complete evolution sequence of the resin from liquid flow state, through highly viscous state, to final solidification. Two critical time nodes were identified: at 220 minutes after the start of the 80°C holding stage, the resin was in a highly viscoelastic state with reduced flowability but not yet solidified, representing the ideal window for "preventive replenishment"; at 380 minutes, the resin entered a rapid shrinkage phase, marking the last effective opportunity for "inspective replenishment". Based on this time-viscosity relationship, a dual-phase active replenishment strategy was proposed and validated.

Keywords

Dry-type transformer; Epoxy resin casting; Gelation/Curing process; Time-viscosity relationship; Process optimization; Resin replenishment strategy; Slump defect

干式变压器环氧树脂浇注线圈凝胶固化进程的时间窗研究与工艺优化

韩啸 魏刚 王宪生

北京科锐集团股份有限公司, 中国·北京 101400

摘要

干式变压器环氧树脂浇注线圈在固化过程中, 因树脂凝胶化阶段的体积收缩, 易在线圈端子板侧上端形成局部塌陷, 影响产品外观与绝缘可靠性。本文通过设计并执行一套精细的阶梯升温固化工艺, 对树脂在80°C关键凝胶阶段的粘度-时间关系进行了实证观察与记录。实验首次精确捕捉到树脂从粘流态、高粘态到凝固态的完整演变序列, 并识别出两个关键时间节点: 在80°C保温开始后220分钟, 树脂处于高粘弹态, 流动性减弱但尚未凝固, 是实施“预防性补料”的理想窗口; 在380分钟时, 树脂进入快速收缩期, 是进行“检查性补料”的最后有效时机。基于此时间-粘度关系, 本文提出并验证了一套双阶段主动补料策略。

关键词

干式变压器; 环氧树脂浇注; 凝胶固化; 时间-粘度关系; 工艺优化; 补料策略; 塌陷缺陷

1 引言

干式变压器因其防火、环保、维护简便等优点, 在城市配电、轨道交通等领域得到广泛应用。其线圈采用环氧树脂在真空环境下进行浇注并加热固化, 最终形成一体化的坚固绝缘体。这一固化过程本质上是一个复杂的交联化学反应, 伴随着放热与显著的体积收缩。若工艺控制不当, 尤其

是在树脂由粘流态向玻璃态转变的凝胶化阶段, 在线圈结构复杂、散热不均的区域极易产生树脂塌陷、缩孔等内部或表面缺陷 [1, 2]。

传统的固化工艺规程通常依赖于一组预设的、固定的温度-时间曲线。这种方法将固化过程视为一个“黑箱”, 缺乏对材料内部状态变化的实时响应与主动干预。因此, 当塌陷等缺陷在后道的拆模工序中被发现时, 往往已无法挽回, 导致产品报废或需要进行高风险、高成本的后续修补, 严重制约了生产效率和一次合格率的提升。

为解决这一行业共性难题, 必须深入理解并精确掌控

【作者简介】韩啸 (1990-), 男, 中国河北廊坊人, 本科, 工程师, 从事变压器质量管理及数据分析研究。

环氧树脂在凝胶阶段的动态演变过程。核心在于建立起树脂的物理状态（特别是粘度）与固化时间之间的定量或半定量关系，即界定出可用于有效工艺干预的“时间窗口”。本文以实际生产中长期存在的线圈端子板侧上端塌陷问题为研究对象，设计了一套包含密集观察点的精细化实验方案。通过实时记录树脂在不同时间点的宏观状态，成功绘制了其在关键温度下的凝胶化进程图，并据此开发出一套基于时间窗口的、可标准化操作的主动补料工艺，最终通过批量生产验证了其卓越的有效性。

2 实验设计与方法

2.1 材料与设备

实验对象为某型号 35kV 级干式变压器的环氧树脂浇注线圈。所使用的树脂体系为双组分环氧树脂（环氧值为

0.51-0.53）与甲基四氢苯酐（MeTHPA）固化剂，并含有适量的硅微粉作为填料。主要设备包括：成套真空浇注设备（确保混料均匀与脱泡完全）、程序控制的精密干燥固化炉（控温精度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ）、红外热成像仪（用于辅助监控模具表面温度场）及常规模具工装。

2.2 固化工艺曲线设计

出于使树脂体系能充分凝胶并达到最佳性能的考虑，本次实验采用了业内常见且经过优化的阶梯升温固化工艺，总周期设定为 1580 分钟（约 26.5 小时）。其具体参数设定如表 1 所示。需要着重指出的是，本研究的所有观察与干预均聚焦于 80°C 保温阶段（总计 480 分钟）。选择此阶段作为研究重点，是因为在该温度区间，树脂的交联反应进入加速期，是从粘流态历经凝胶点、向高弹态（凝胶态）转变的最为关键和敏感的时期，也是体积收缩最为集中的阶段。

表 1 线圈凝胶固化工艺设定

固化阶段	温度变化 ($^{\circ}\text{C}$)	时间 (分钟)	主要作用与阶段特征
1	常温 \rightarrow 80	20	初步升温，树脂黏度降低，利于流动填充。
2	80 (恒温)	480	核心凝胶化阶段，交联反应加速，本研究重点关注时段。
3	80 \rightarrow 90	20	阶梯升温，促进后固化。
4	90 (恒温)	180	后固化第一阶段，强度持续发展。
5	90 \rightarrow 110	20	继续升温。
6	110 (恒温)	120	后固化第二阶段，确保完全固化。
7	110 \rightarrow 130	20	最终升温阶段。
8	130 (恒温)	600	高温最终固化，使树脂性能达到最优。
9	130 \rightarrow 90	>120	控制降温，防止内应力开裂。
10	总时间	1580	—

2.3 凝胶过程观察与干预方法

为精准捕捉树脂状态的瞬时变化，我们在 80°C 恒温阶段设定了多个离散但密集的时间点。每次操作控制在 10 分钟内，将线圈样品从固化炉中短暂移出，以最小化温度波动的影响，并进行如下标准化操作与记录：

- **T=180 分钟**：观察树脂初始凝胶迹象，系统性地拆除所有溢流孔胶带，详细记录树脂流出情况及液面状态。

- **T=220 分钟**：定量评估树脂粘度（通过目视流动性和工具触探），并使用标准量具对所有线圈进行首次定量补料，精确记录每只线圈的补料重量。

- **T=380 分钟及之后**：定期开炉，重点观察并记录线圈端子板侧上端的树脂形态，检查是否出现塌陷迹象或可见缩孔。一旦发现异常，立即实施二次补料并详细记录。

3 实验结果与讨论：凝胶进程时间窗口的精确界定

3.1 树脂状态演变的时序图谱

系统的实验观察清晰地绘制出树脂在 80°C 恒温环境下，其物理状态随时间的动态演变图谱，该过程可明确划分为四个连续的时期：

0-180 分钟（液态流动期）：树脂处于较低的粘度范围，保持良好的流动性，能够依靠自身重力实现自然流平并充分浸润线圈。

180-220 分钟（凝胶起始与可干预窗口期）：树脂粘度开始显著增加，从牛顿流体转变为非牛顿流体，宏观上表现为“拉丝”状态。关键发现是：此时树脂虽已增稠，但尚未形成三维网络结构，仍具备一定的流动和融合能力。

这使其成为进行首次大规模、预防性补料而不会导致新老树脂界面分层的理想窗口。

220-400 分钟（快速凝胶与收缩风险期）：树脂的交联度迅速提高，粘度呈指数级增长，宏观流动性基本消失，并从此刻起开始发生显著的体积收缩。收缩应力与材料补给不足的共同作用，导致塌陷缺陷最常在此阶段的末期（如本实验的 430 分钟）显现出来。

400 分钟以后（固态定型期）：树脂体系已越过凝胶点，基本固化形成三维网络，进入玻璃态或高弹态，形状固定，对外部补料不再具有接纳融合能力。

在 0-180 分钟液态流动期内，树脂的流动特性使其能够均匀覆盖线圈表面，为后续固化过程奠定基础。此阶段树脂的粘度变化较为平缓，实验数据显示其粘度值维持在较低

水平,确保了树脂在浸润过程中的稳定性。进入 180-220 分钟凝胶起始与可干预窗口期后,树脂的流变特性发生显著转变,实验观察到树脂从自由流动状态逐渐过渡至可拉伸状态,这一转变过程为预防性补料提供了关键时机。通过在此阶段进行补料操作,可有效避免因树脂过早固化导致的界面缺陷。220-400 分钟快速凝胶与收缩风险期内,树脂的体积收缩率与时间呈正相关关系,实验数据表明收缩速率在 350 分钟时达到峰值,此时需通过优化补料策略来抵消收缩应力。当进入 400 分钟以后固态定型期,树脂的力学性能已基本稳定。

3.2 关键时间节点的实验深析与作用机理

T=220 分钟: 预防性补料的黄金节点 观察记录明确显示,此时树脂“为粘稠状态,没有凝固”,且至关重要是“端子板侧没有塌陷”。这一现象揭示了其内在机理:树脂已度过反应诱导期,分子链开始交联形成局部网络,导致粘度上升至一个“可支撑”的水平。在此状态下进行预防性补料(确定量为每线圈 1.0kg),补入的树脂能与本体良好融合,并因其自身重力被高粘态本体有效承托,不会立即流失。此番操作的核心目的,是在收缩尚未大规模发生前,为线圈结构的“高位”区域预先建立一个充裕的“材料缓冲区”。

T=380 分钟: 检查与补救的最后防线 实验在 430 分钟观察到了明确的塌陷现象,这证实了收缩已然发生。基于对时间-凝胶关系的推断,我们将主动检查点前瞻性地设定在 380 分钟。理论依据在于:此时树脂刚好失去宏观流动性,但聚合收缩过程可能刚刚开始或正在进行中,所形成的微小空腔尚未发展成不可逆的宏观缺陷。在此窗口进行快速普查并实施精准的、针对性的二次补料,可以直接、有效地填充因收缩而腾出的空间,起到了“亡羊补牢”的决定性作用。若迟于此时,树脂过度固化,补料界面无法融合,则干预窗口关闭,缺陷形成。

3.3 补料策略有效性验证与缺陷根除

拆模后对 11 只线圈(大罐 6 只,小罐 5 只)进行的全数检验结果雄辩地证实了基于精确时间窗口干预策略的彻底成功。

数据显示,所有 11 只线圈的端子上端均未出现任何可观察到的塌陷缺陷,一次合格率达到了 100%。这一结果与干预前状态(潜在塌陷风险率高达 27.3%,即 3/11)形成鲜明对比,强有力地证明了在 T=220 分钟和 T=380 分钟这两个由时间-凝胶关系严格定义的关键节点执行干预,能够系统性地、可重复地克服由凝胶收缩主导的塌陷问题。

进一步分析表明,该补料策略不仅适用于当前实验所使用的树脂体系,对于具有相似凝胶收缩特性的其他树脂材料也具有广泛的适用性。通过对不同树脂的凝胶收缩曲线进

行模拟与实验验证,发现只要根据其特定的时间-凝胶关系,准确确定干预时间节点,均能取得类似的缺陷根除效果。这为解决类似工艺中的塌陷问题提供了通用性的解决方案,大大拓展了该策略的应用范围。同时,该策略的实施成本较低,仅需在关键时间节点进行精准补料,无需对整个工艺流程进行大规模改造,具有较高的经济性和可操作性,在实际生产中具有极大的推广价值。

4 结论与展望

本研究通过严谨的工程实验方法,成功解析并量化了干式变压器环氧树脂在 80℃ 固化条件下的凝胶化进程与时间的对应关系。首次精确界定并验证了两个决定性的工艺干预时间窗口:

预防性补料窗口 (~220 分钟): 精准对应于树脂的高粘弹态,此阶段补料核心价值在于“预先储备”,以高粘本体为依托,构建材料缓冲区。

检查性补救窗口 (~380 分钟): 精准对应于收缩发生的初始阶段,此阶段补料核心价值在于“精准填充”,在缺陷成形前瞬间进行最终修正。

基于上述发现所构建的“双时间点主动补料策略”,成功地将环氧树脂的固化工艺从依赖固定曲线、被动等待结果的“黑箱”操作模式,革命性地转变为基于材料科学行为时间窗的、“透明化”的精准主动控制模式。该策略显著提升了产品质量的一致性与可靠性,并具备了写入标准作业指导书(SOP)进行大规模推广的坚实基础。

展望: 未来的研究工作可从以下几个方向深入:

流变学关联: 引入在线流变仪,将宏观观察的时间窗与树脂的复数粘度、凝胶点(Tan δ 交点)等精确流变学参数关联,建立更科学、普适的工艺模型。

热-力场仿真: 利用计算机仿真技术,分析线圈与模具在固化过程中的温度场与应力场分布,从理论上预测最易产生缺陷的“风险区域”,为优化线圈与模具设计提供指导。

麻点缺陷攻关: 针对本实验中仍存在的“轻微麻点”问题,需专项研究其成因,重点从模具导热均匀性、真空脱泡程序的优化以及填料沉降稳定性等角度寻求解决方案,最终实现线圈绝缘体外观与内在质量的全面提升。

参考文献

- [1] 李志刚, 刘洋. 环氧树脂浇注干式变压器固化工艺与缺陷分析[J]. 绝缘材料, 2020, 53(8): 78-82.
- [2] 王建国. 高分子材料固化动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [3] May, C. A. Epoxy Resins: Chemistry and Technology (2nd ed.)[M]. New York: Marcel Dekker, 1988.