

# 适当应用导热材料将如何提高电机功 率密度

洛德公司开放式技术创新项目研究员 Daniel Barber  
LORD Corporation

# 适当应用导热材料将如何提高电机功率密度

## 摘要

电机设计师多年来一直致力于电机设计。电机热损失掠夺了运动系统功率，降低了效率。过热可以降低电机可靠性，缩短其寿命。同时，所有运输行业的电气化驱动着电机要求向着越来越高的功率密度发展。电机及其电力电子驱动器中良好的热管理可以最大限度地减少损耗，特别是铜 ( $I^2R$ ) 损耗，并且可以提高性能、可靠性和效率。研究显示，采用洛德公司高导热性材料的灌封或封装工艺可以显著降低规定负荷下电机的工作温度。概念验证研究探索了使用导热材料的灌封电机端绕组和电力电子元件的优点。结果显示，工作温度显著降低，这与电机效率较高和输出功率两位数增量相关。

## 介绍

当时还是瑞典斯德哥尔摩KTH电机工程学院一名研究生的Shafiqh Nategh在研究中证明了高导热性材料对电机性能的改善能力。Nategh的研究“高性能电机的热分析和管理”涉及高性能应用电机的热管理方面，特别专注于为混合电动汽车应用而设计的电机。

在Nategh的研究中，对LORD CoolTherm™ SC-320导热灌封材料（一种用于真空灌封且具有极低粘度而相对柔软的高导热性材料（ $3.2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ））进行了评估。专为电气/电子应用而设计的电绝缘硅密封剂在保持与硅酮相关的理想特性的同时提供了优异的导热性能。CoolTherm SC-320是一种二组分系，固化时在组分上表现出低收缩和应力，并保持低粘度，便于组分封装。CoolTherm SC-320既耐环保又经UL认证符合UL94V0和180C RTI，由加成固化聚二甲基硅氧烷聚合物组成，在密闭空间中加热时不会解聚。

在Nategh论文的第一部分中，基于集中参数（LP）和数值方法的组合，提出了液冷（水和油）电机（即电机）的新型热模型。评估了配备外壳水套的永磁辅助式同步磁阻电机（PMaSRM），以及油与定子叠片直接接触的油冷感应电机。在论文的第二部分，评估了使用不同绕组浸渍和钢层压材料的热冲击。

研究了常规的清漆和环氧树脂，以及硅基导热浸渍材料（CoolTherm SC-320），并比较了三台小型永磁电动机所产生的温度分布。

在比较各种浸渍材料的影响时，在各种灌封电机的各种冷却剂流量和电流水平下测量了绕组的热点温度。使用 CoolTherm SC-320 浸渍的电机的热点温度通常比仅用清漆的电机温度低 40°C 至 45°C，比环氧灌封电机温度低 12°C 至 15°C 左右。

尽管 CoolTherm SC-320 的粘度略高于环氧树脂和清漆的粘度，但在真空灌装中没有任何困难。此外，即使灌封并非 100% 稠密，灌封化合物也能有效降低热点温度。例如，随着灌封密度从 80% 降低到 50%，使用 CoolTherm SC-320 灌封的电机的热点温度仅提高了 3°C，而随着灌封密度从 80% 降低到 50%，环氧和清漆灌封电机的热点温度分别增加了 19°C 和 25°C。

Nategh 的研究表明，与未封装的电机相比，使用 CoolTherm SC-320 材料后热点温度可以降低 35% 至 50%，而使用典型的环氧灌封材料只能改善 20% 至 30%。灌封化合物可以显著改善电机的功率密度。

根据电流，电机的热点温度降低可使给定电机尺寸的可实现功率/转矩增加，使所需功率/转矩的电机尺寸减小，并且在达到温度极限前具有更长的电机运行时间。

## 分析测试数据

在 Nategh 的论文中发现的其他数据分析是在洛德公司进行的。根据灌封材料的导热系数（仅清漆，0.25 W/m·K；环氧树脂 0.9 W/m·K；和 CoolTherm SC-320 3.2 W/m·K）、冷却剂流量和施加电流制备了论文中的热点温度。使用常规统计分析软件将数据作为三变量一般析因试验设计来分析。结果表明，端绕组温度主要取决于浸渍材料的电流和导热系数，但对冷却剂流量没有统计学上的显著影响。

统计分析进一步表明，使用 CoolTherm SC-320 灌封化合物，平均端绕组温度比仅含清漆的电机温度低 25°C 到 45°C；比环氧浸渍电机的温度低 10°C 至 15°C（图 1）。单与清漆相比，在使用环氧树脂的情况下，达到最高温度 150°C 所需的估算可行电流比其高 14%，而在使用 CoolTherm SC-320 的情况下比其高 26%。

由于电流与扭矩直接相关，所以灌封电机经改善的热性能具有以下优点：

- 更高的功率密度 – 来自类似尺寸电机的扭矩/马力更大；来自较小电机的扭矩/马力相同；以及从电机中去铜或去钢的能力。
- 更好的可靠性 – 低温操作可以防止绝缘层快速降解，从而延长电机绝缘寿命。
- 铜损较低 - 低运行温度可转化为低铜损；低电流阻抗 = 低于  $I^2R$  损耗。

## 独立的灌封研究

为了独立验证使用高电导率热材料改善电机性能的功效，洛德公司与一家工程咨询和服务公司高级电机技术携手合作。高级电机技术参与了工业和高性能机器的研究、开发、制造、测试和重新设计。

高级电机技术在一台不同于洛德公司研究所用的电机上测试了灌封化合物。他们购买了 F 级 3 马力 182T 机架全封闭风扇冷却 (TEFC) 电机，额定转速为 1760；电压：208-230/460，三相，60Hz；满载电流：8.4-7.8/3.0。对于测试程序，他们知道在标准电机中使用树脂可以提高电机的性能，使电机运行更散热或使其运行更困难而不超过其额定温度。高级电机技术在没有任何先入为主的结果的情况下开始了测试。

每个电机端（驱动端和风扇端）安装六个热电偶，每个绕组基座两个，共12个热电偶测量绕组温度。同时还将热电偶加入电机面板以监测外界温度。使用“快速满载测试”对四个“待机”电机进行了测试。从该测试中，选择具有相似电流、功率和温升的两台电机进行后续测试。

对未灌封电机上进行同等比较的对照试验。电机耦合到直流发电机。测力计精确地控制发电机的功率输出，而数字仪表提供扭矩传感器的读数。为了确定电机之间的精确比较，在相同的房间内进行了测试，这些房间具有同样的负载、发电机和仪表，以及相同的环境温度（24.8°C）。在测试期间，运行电机直到电机热稳定。随着时间的推移，电机的温度升高。风扇端运行温度较低，轴端运行温度较高，两台电机均按照制造商的说明进行操作。

在选择用于测试的两台电机中，一台未灌封，一台用 CoolTherm SC-320硅胶灌封。对于灌封电机测试，将 CoolTherm SC-320树脂与CoolTherm SC-320硬化剂混合。在这项工作中，将CoolTherm SC-320硅胶注入电机，尽管硅胶可以应用于手持式墨盒或自动流量计/混合器/分配设备。利用真空来最小化气泡。允许密封剂在室温下固化24小时。它也可以在125°C下更快地固化60分钟。固化后，取下插入物，清洁气隙。在封装过程中，高级电机技术的工作人员发现，CoolTherm SC-320未表现出任何在其他环氧化合物中常见的“强烈”气味或“眼睛刺激性”烟雾。

在灌封电机对比未灌封电机中使用相同的负载条件- 满载试验（100%转矩）。测试结果表明，灌封电机的平均整体温度低7°C（即54°C，相比于未灌封控制电机的61°C）。风扇和驱动侧之间的温差仅为3°C，相比于未灌封电机的5°C至6°C。因此，使用CoolTherm SC-320封装的灌封电机比未灌封电机的运行温度更低。（图1和图2）

在过载条件（164%和174%额定转矩）下也对两台电机进行了测试，以确定极端条件下的热效应。在最高扭矩下，灌封电机的平均温度比未灌封电机的低30°C。这是一个显著的差异，可能导致预计八倍长的电介质寿命。灌封电机中驱动器和风扇侧之间的温差较小（ $\Delta T = 9^{\circ}\text{C}$ ，分别相比于灌封电机和未灌封电机的16°C）。

与未灌封电机相比，灌封电机还表现出明显的表层温差。测试表明，虽然平均表层温度大致相同，但是灌封电机在最热和最冷点之间只有8°C的差异，而未灌封电机则有20°C的差异。因此，灌封电机的表层温度分布更均匀。这可归因于硅树脂的气隙填充性能。CoolTherm SC-320可均匀平滑地灌装端绕组周围的所有气隙。这导致电机框架周围的均一温差，有助于减轻电机运行时可能产生的任何应力和性能问题。

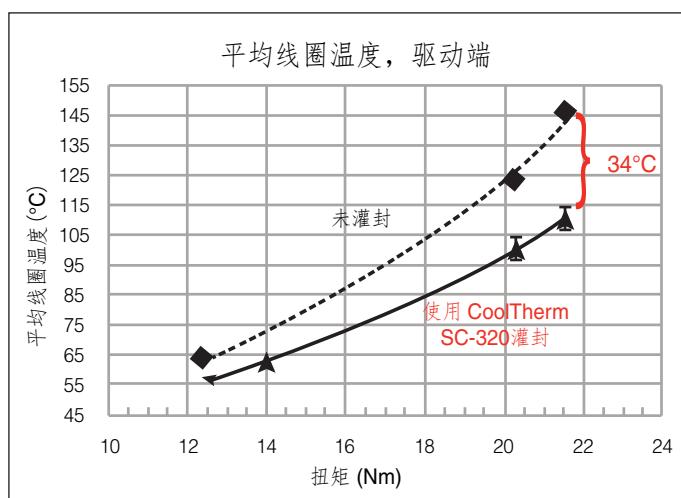


图1：平均线圈温度 - 驱动端

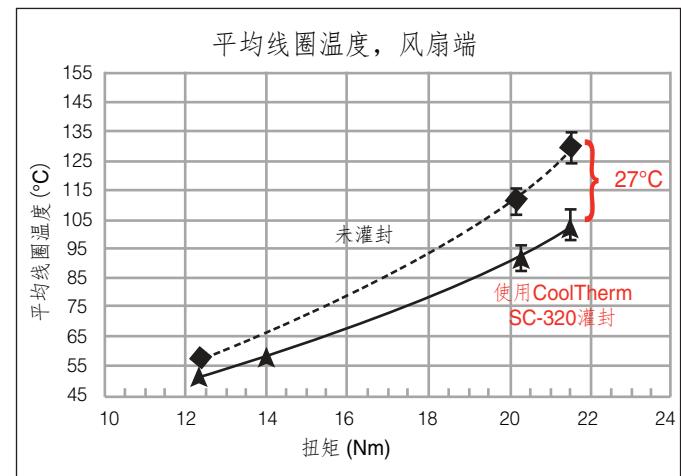


图2：平均线圈温度 - 风扇端

## 结论

洛德公司和KTH的测试结果清楚表明了使用导热材料灌封的优点。使用CoolTHERM SC-320灌封的电机在给定温度下提供更多的扭矩和马力，并且在相同扭矩下提供更高的可靠性和更低的铜损耗（图3）。测试结果表明，在施加最高的扭矩和载荷下，温差为30°C，铜损的改善率约为10%。或者，在相同的最高温度下，使用灌封电机的扭矩改善率为16%。

CoolTHERM还保留了与硅酮相关的理想特性，开发用于为电气/电子封装提供卓越的导热性。低粘度密封剂在降低空气滞留风险的同时提供了更好的流动性。它设计有较低的硬度计，以减少电子元件的机械应力，降低故障的可能性。由于温度变化，它的低热膨胀系数会导致应力较低。

CoolTHERM的可能用途包括需要高功率轻重量的设备，如电动汽车电机；航空航天制动器和电机；和便携式发电设备。更好的电机热管理有助于减少电流，从而减少提供必要电力所需的能量；并且还可以延长电机的使用寿命。由于电机绕组所需的铜线数量减少，所以还可以节省成本。因此，根据应用，可以节省重量、能量和/或成本。

洛德公司将继续与发展伙伴合作，验证在电机灌封应用中使用高导热材料的优点。这些优点包括：更高的功率密度 - 通过热灌封材料减少铜和钢的重量；提高可靠性 - 大大降低工作温度，消除热点；并提高效率。

### 使用导热材料灌封的优点

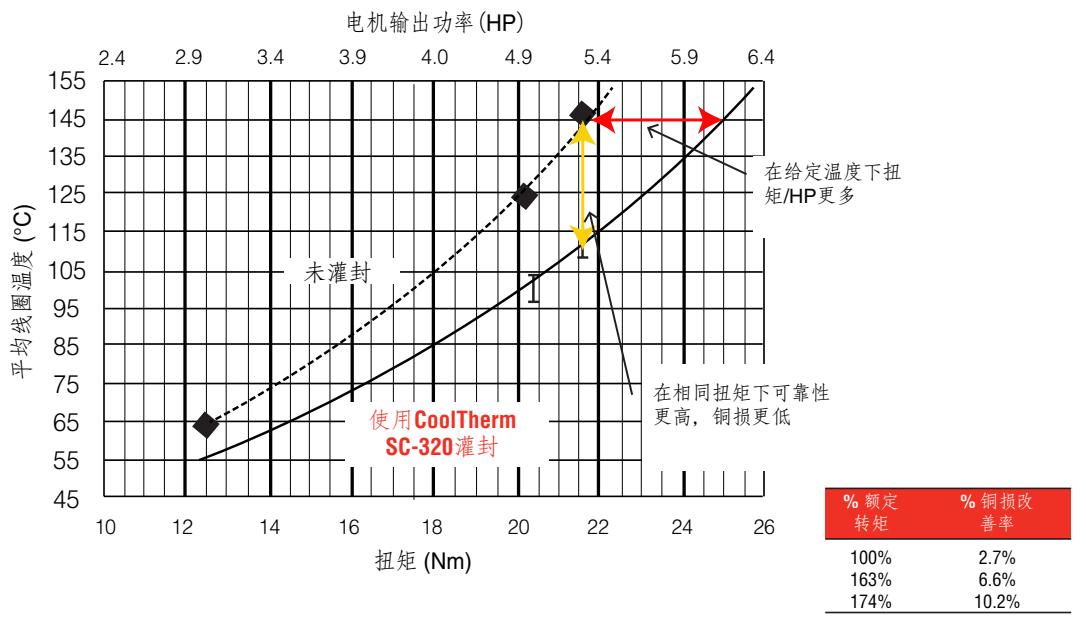


图3：使用导热材料灌封的优点（CoolTHERM SC-320 encapsulant）

CoolTherm 和“Ask Us How” 是LORD Corporation或其子公司的商标。

---

洛德(LORD) 提供与粘合剂与涂层、振动与运动控制、磁响应技术有关的宝贵专业知识。本公司工作人员与客户通力合作，帮助其提高产品价值。在日新月异的市场上，我们不断创新，迅速响应，致力于为全球客户提供解决方案 ... Ask Us How。

**LORD Corporation**

**全球总部**

111 Lord Drive

Cary, NC 27511-7923

USA

[www.lord.com](http://www.lord.com)

**洛德中国**

中国（上海）自由贸易试验区日樱北路333号

邮编: 200131

邮件: [marketing.china@lord.com](mailto:marketing.china@lord.com)

电话: +86 21-3133 0800

传真: +86 21-2042 2361

想了解 LORD Corporation 世界范围内分公司的位置列表，请访问网站 [LORD.com](http://LORD.com)。