

加速耐久性测试验证灌封电机 功效

Daniel Barber, 研究员
LORD Corporation

加速耐久性测试验证灌封电机功效

摘要

多年来，电机设计师一直被电机设计中的散热问题所困扰。电机的热损失会影响运动系统的功率、导致运行效率下降，而过热则会降低电机的可靠性，缩短其使用寿命。同时，所有运输行业的电动化，驱动着电机向着越来越高的功率密度发展。良好的电机及电力电子驱动器热管理可以最大限度地减少损耗，特别是铜（I²R）损耗，并且可以提高性能、可靠性和效率。此前的研究表明，使用洛德公司的高导热材料的灌封或封装工艺，可以显著降低设定负载下电机的运行温度。进一步的研究表明，使用高导热环氧树脂时，电机的运行温度显著降低，而且有助于提高电机效率并实现高达两位数的输出功率增幅。此外，这些电机在严苛的热循环过程中具有很高的抗开裂性，为在更小尺寸上实现更高功率/扭矩的持久、高热效率电机铺平了道路。

介绍

LORD CoolTherm™ SC-320 导热有机硅灌封胶是由电子行业热管理、灌封和封装材料的领先供应商洛德公司十多年前开发的，用于满足各个行业对低粘度、高导热率有机硅的市场需求。它专门针对电气/电子封装应用设计，提供更高的导热率，近年来，这种成熟的导热材料的诸多优势已经得到汽车终端用户的认可。

这种绝缘有机硅灌封胶是一种相对较软的高导热材料（3.2 W / m·K），具有足够低的粘度，适用于真空灌封。这是一个双组分体系，旨在保持有机硅相关的性能。CoolTherm SC-320灌封胶具有耐环境性和UL认证，符合UL94V0和180°RTI，由一种加成固化型聚二甲基硅氧烷聚合物组成，在有限空间内加热时不会分解。该聚合物具有低收缩和低应力，因为其固化并保持低粘度，便于灌封（与其它高导热材料相比）。

CoolTherm SC-320灌封胶的目标应用包括需要更高功率和更轻质的产品，如电动汽车的电机和车载充电器；航空航天执行器，发电机和电力电子设备；以及便携式发电设备。更好的电机热管理可以减少设定电流，从而减少提供必要功率所需的能量。它也有助于延长电机的使用寿命。电机绕组所需的铜线量的减少，也有助于节约成本。因此，根据具体的应用，可实现减轻重量、节约能量和/或成本等效益。

早期研究

2009年到2013年，瑞典斯德哥尔摩KTH电气工程学院的研究生Shafigh Nategh就高性能应用中电机的热管理问题进行了突破性研究，特别关注混合动力电动车的电机应用。Nategh的研究结果表明，当使用导热材料时，与不做任何灌封的情况对比，热点温度可以降低35到50°C。早期研究还发现，典型的环氧树脂灌封材料含有一种降低CTE（热膨胀系数）的有机填料，但并非专门为导热而设计，与未灌封的电机相比，其温度降低范围仅为20到30°C。

Nategh在他的研究中使用CoolTherm SC-320灌封胶作为导热材料，证明灌封胶可以显著改善电机的功率密度。热点温度的下降取决于电流，可以提供：

- 在指定电机尺寸下增加功率/扭矩
- 减小提供所需功率/扭矩的电机的尺寸
- 电机在达到其温度极限之前运行时间更长

Nategh 在2013年题为“高性能电机的热分析与管理”的博士论文中详细介绍了近五年的研究成果。在论文的第一部分，基于集总参数（LP）和数值方法的结合，提出了液冷（水和油）电气设备（即电机）的新热模型。论文评估了油与定子叠片直接接触的油冷式感应电动机与配备有壳体水套的永磁辅助同步磁阻电机（PMSRM）。

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影响。研究了常规清漆、环氧树脂和有机硅导热浸渍材料（CoolTherm SC-320灌封胶），并比较了三个小型感应电动机的温度分布。

在比较各种浸渍材料的影响时，Nategh评估了各个灌封电机在不同冷却剂流量和电流水平下绕组的热点温度。用CoolTherm SC-320灌封胶浸渍的电机的热点温度一般比清漆浸渍的电机低40~45°C，比环氧树脂灌封的电机低12~15°C。尽管CoolTherm SC-320灌封胶的粘度略高于环氧树脂和清漆的粘度，但在真空填充方面没有任何困难。另外，即使灌封不是100%致密，灌封胶也能有效降低热点温度。例如，随着灌封密度从80%降低到50%，用CoolTherm SC-320灌封胶灌封的电机的热点温度仅增加3°C，而当使用环氧树脂和清漆灌封的电机的灌封密度从80%降低到50%时，其热点温度则增加了19和25°C。

为了用更常规的电机来验证这些结果，洛德与位于佛罗里达州圣彼得堡的Advanced MotorTech的Keith Klontz博士和他的团队合作，对原装和用CoolTherm SC-320灌封胶（3马力[hp]，全封闭风扇冷却电机）灌封的工业感应电机进行了初步研究。结果显示，使用导热材料CoolTherm SC-320灌封胶的电机比未灌封的，仅使用对流来冷却外壳的电机低35°C。洛德通过以下途径公布了结果：

- <https://chargedevs.com/motor-power-density-whitepaper-download/>
- IEEE 国际电机与驱动会议（IEMDC），2015年5月10-13日，爱达荷州科达伦
- IEEE 电气制造与线圈博览会（EMCW 2015），2015年5月13日，威斯康星州密尔沃基市。
- H. Li, K. W. Klontz, V. E. Ferrell, D. E. Barber, IEEE 工业应用汇刊, 2017, 53(2), 1063-1069.

上述工作验证了CoolTherm SC-320灌封胶等导热材料可为电机设计人员带来的主要优势：提高功率、延长使用寿命和提升效率。洛德将持续开发材料，验证热和热循环性能，并寻找技术的早期采用者。

新发现

性能研究扩展到环氧树脂材料 - 包括具有3.5 W/m·K导热率和高热稳定性的洛德环氧树脂，现在已经商业化的洛德 CoolTherm EP-3500导热环氧树脂灌封胶，和两种其它生产商的环氧树脂。此外，为了评估灌封对电机寿命的影响，洛德完成了加速老化测试，包括室温与高于200°C之间的热循环。

性能测试

在原有的合作基础上，洛德与Advanced MotorTech又新增了与此前的工作相同类型的灌封电机（高效3-hp NEMA，耐热性为F级的工业电机）：一个未灌封，三个使用不同的材料灌封。在灌封之前，每个电机定子绕组的每一端安装六个热电偶（每相两个）。报告的温度是热电偶读数的计算平均值。用于灌封定子的环氧树脂分别为：CoolTherm EP-3500灌封胶（3.5 W/m·K环氧树脂）；一款同类环氧树脂（竞争对手1），导热系数为1.2 W/m·K;和另外一款同类产品（竞争对手2），其技术数据表声称导热系数为4 W/m·K，但由洛德测得的实际电导率为1.6 W/m·K。

所有电机都在额定转速（1750 RPM）和多种输出功率值（100%，大约160%和大约174%的额定功率）下进行测试，并连续运行，直到温度稳定（通常大约两个小时）。我们之前的白皮书和出版物中描述了详细的方法以及使用CoolTherm SC-320灌封的初始结果。图1中显示了额定扭矩为174%时的端部绕组温度，与不同材料的体积导热率相对应。CoolTherm EP-3500灌封胶的温度比竞争对手低10-15°C，比未灌封的电机低30°C，验证了我们以前的结果。

加速老化测试

这四台相同的电机在位于北卡罗来纳州罗利的Advanced Energy的电机和驱动测试实验室接受了加速老化测试。目的是在较短的时间内使电机发生故障，从而使电机超出设定的热范围。最高温度为155°C的F级电机被迫在高于此温度的条件下工作，在测试的大部分时间内温度均超过200°C。

测试条件会不断调整，使竞争对手1的电机达到预定的目标端部绕组温度；其它电机在相同的条件下运行并测量其产生的温度。所有的电机都在高于155°C的极限温度条件下都能很好的运行。竞争对手1的电机温度在一周内上升到最终温度240°C。

测试方案包括高扭矩、低转速和短循环持续时间条件下每小时400次以上的启动，因此电流会使电机加热到平衡温度。每组电机的周期时间为2.7秒，并在整个测试过程中保持固定。对每小时启动次数的调整只能通过改变非周期时间的持续时间来进行，这样就可以使电机达到并维持定子温度，远高于其绝缘等级。

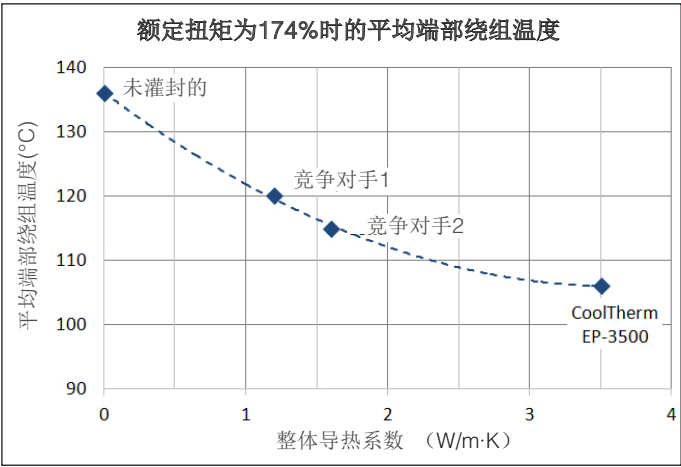


图 1: 额定扭矩为174%时的平均端部绕组温度

在整个测试过程中，每10秒记录一次电机温度、环境温度和总循环次数。电机每天工作6至8小时（上午8点至下午5点），然后在夜间冷却至室温。该过程重复25天，提供关于热循环稳定性的额外信息。每五天提高一次目标温度。最初的目标温度是155°C（F级），然后是H级（180°C），然后温度每周增加20°C，直到电机失效。测试过程中不会采取外部方式主动冷却电机，完全依靠自然对流。测试从2016年1月15日开始，每天都进行测试（不包括周末），直到所有电机失效。

使用高导热性灌封材料时，由于平均绕组温度的降低，电机性能显著改善。测试过程中，观察到平均端部绕组温度和导热材料之间存在相关性，特别是在更高的马力条件下。未灌封电机的持续运行温度一般比竞争对手的电机高25°C。使用CoolTherm EP-3500灌封胶的电机的运行温度比竞争对手的电机低20°C，比未灌封电机的温度低40°C至45°C。图2显示了每天的平均端部绕组温度，图3显示了电机温度与未灌封电机的差异。

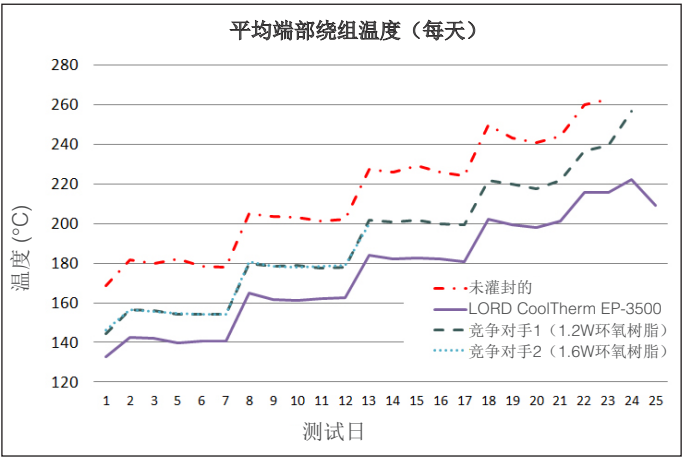


图 2: 平均端部绕组温度（每天）

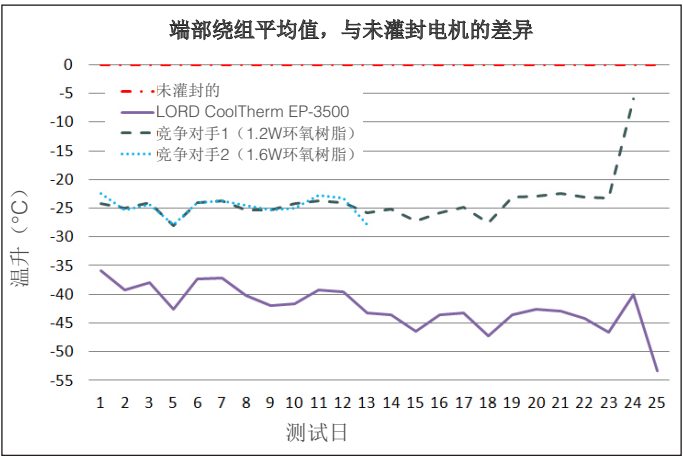


图 3: 端部绕组平均值-与未灌封电机的差异

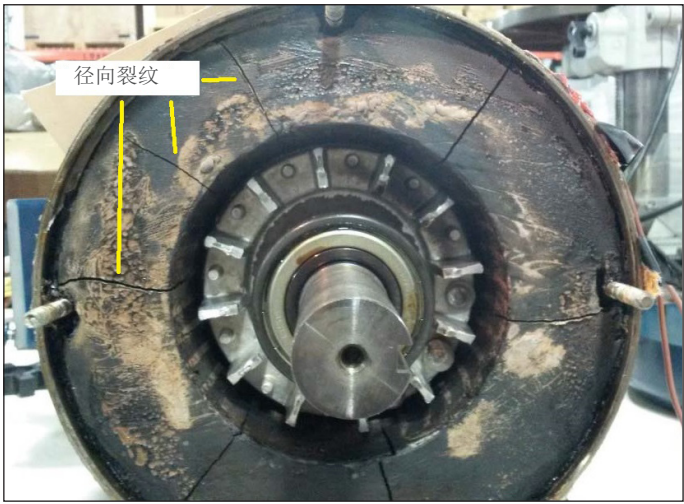
采用竞争对手2环氧树脂的电机在测试的第13天首次失效，竞争对手1在测试的第24天失效。两种竞争对手的环氧树脂都有多处严重的应力开裂。使用CoolTherm EP-3500灌封胶的电机在老化研究中的持续工作时间最长，未出现应力裂纹，这主要得益于其高达206℃的玻璃化转变温度（T_g）。图4比较了使用竞争对手1和CoolTherm EP-3500灌封胶的定子的测试后外观，从中可看出在裂纹上的差异。

洛德也正在汇总与电机故障有关的数据。初步结果证实，在所有的已灌封电机中，气隙中存在黑色材料积聚，并最终导致转子被卡住。未灌封的电机中也存在黑色的分解材料，但没有导致转子被卡住；这台电机由于电气短路而在第24天失效。使用竞争对手2的环氧树脂的电机由于导线短路和转子卡住而失效；使用竞争对手1的环氧树脂和CoolTherm EP-3500灌封胶的电机由于转子卡住而失效，未发生短路。鉴于所有电机中都存在黑色材料，因此很可能是由于电机的涂料或其它电机通用材料分解所致。

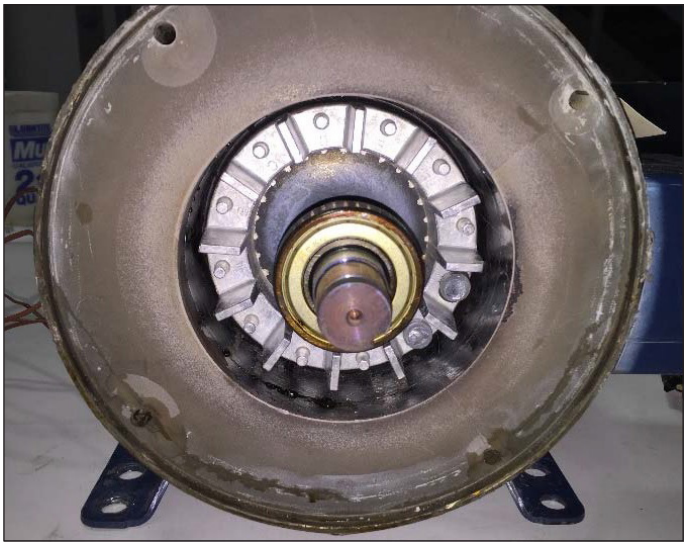
终端用户体验

在大量的实验室测试之外，洛德还与最终用户实施了现场测试。根据具体的配置情况，在相同峰值温度下，最大功率输出提升了20%到30%。此外，使用CoolTherm EP-3500灌封胶的客户电机的温度最大降幅可达40℃，极大地提高了电机效率和使用寿命。

洛德还向市场推出了另一种环氧树脂LORD CoolTherm EP-2000环氧导热灌封胶，以满足客户对可渗透到紧密绕组和/或细线之间的导热、低粘度材料的需求。这种材料具有与CoolTherm EP-3500灌封胶相同的高温稳定性，但导热率较低，约为2 W/m·K。在客户测试中，CoolTherm EP-2000灌封胶实现的降温幅度超过20℃，并且表现出良好的高温和高压稳定性。



使用竞争对手1的环氧树脂灌封的电机定子



使用CoolTherm EP-3500 灌封胶灌封的电机定子

图 4: 测试后外观 - 竞争对手1环氧树脂和CoolTherm EP-3500灌封胶之间的裂纹比较

概述和结论

最新的测试证实了Shafigh Nategh博士在2013年报告的内容: 用导热材料灌封的电机可以获得比未灌封或环氧树脂灌封的电机更好的性能。我们的研究表明:

- 灌封高导热材料的电机的热点温度通常比仅使用清漆的电机低40~45°C, 比灌封普通环氧树脂的电机温度低20°C左右。
- 在加速老化测试期间, 使用CoolTherm EP-3500灌封胶的电机的持续时间最长, 并且灌封材料未出现应力开裂。

热点温度的降低可以帮助电机设计人员:

- 提高指定电机尺寸下可实现的功率/扭矩
- 减小提供所需功率/扭矩的电机的尺寸
- 通过降低工作温度显著延长电机的使用寿命

最理想的处理方式是在设计阶段便集成洛德解决方案, 这样便于最大限度地简化灌封, 并且充分利用灌封材料的高导热性。

欲了解更多信息, 请访问 www.LORD.com/CoolTherm 或 <http://ieeexplore.ieee.org/document/7790847/>

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

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

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。