

# 电池冷却性能

液态导热填缝胶与导热垫片的比较  
白皮书

# 电池冷却性能

## 液态导热填缝胶与导热垫片的比较



Dr. Daniel Barber - 职业科学家II



Eric Wyman - 全球首席应用工程师

### 引言

洛德之前的白皮书描述了CoolTherm液态原位固化型导热填缝胶作为电动汽车（EV）高功率密度电池组热界面材料（TIM）的使用情况。<sup>1</sup>在这一白皮书中，我们比较了填缝胶与具有相似导热率和厚度的市售导热垫片的热阻。正如白皮书所述，两个接触表面（例如电芯或模组与冷却板）之间的表面粗糙度会导致仅有一部分外表面彼此直接接触，从而会留有空气。

<sup>1</sup> T. Forney 等，液态导热填缝胶与导热垫片：热性能案例研究，<https://www.lord.com/products-and-solutions/electronic-materials/thermal-management-materials/gap-filters-vs-thermal-pads>

基于稳态热分析，我们发现，与具有相当导热率和厚度的导热垫片相比，洛德液态导热填缝胶可以提供更低的热阻。之所以出现这一结果是因为填缝胶可以轻松与相邻基材的微观粗糙表面相契合（参见图1），以显著降低界面阻抗。CoolTherm SC-1200 填缝胶的这种契合效果非常明显，其在1mm厚度下具有2 W/m·K的导热率 - 这与导热率为4 W/m·K的导热垫片性能相当。

本白皮书主要研究填缝胶与导热垫片导热率对电池模组冷却的影响。分别使用导热率为2和4W/m·K的洛德填缝胶组装电池模组，同时还使用具有相同标称导热率的市售导热垫片进行组

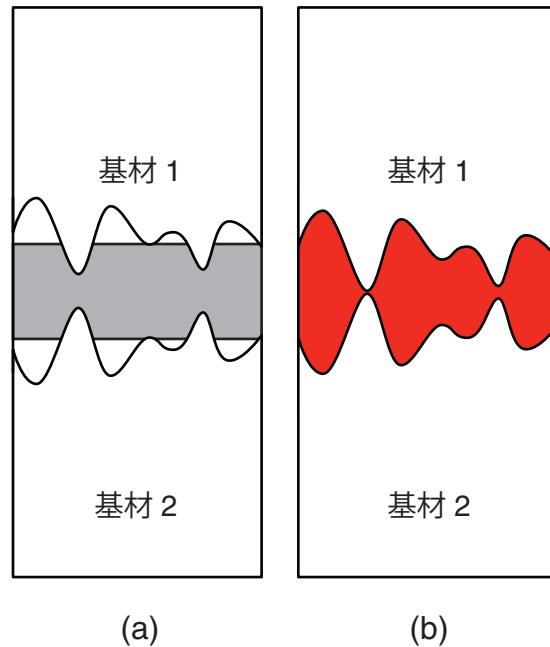


图1：缺乏契合性的固体导热垫片（左）与液态导热填缝胶（右）的微观图示

### 摘要

本研究旨在比较电池模组和冷却板之间采用不同热界面材料（TIM）对电芯热性能的影响。我们将CoolTherm<sup>®</sup>液态导热填缝胶与具有相近导热率的导热垫片进行了比较。研究显示，与导热垫片相比，填缝胶可以为电池排出更多的热量，使电池温度更低。此外，在模拟存在公差的情况下填缝胶也能够提供优良性能，而导热垫片却表现较差。

装。然后在快速充电循环期间测量每个组装模组的冷却程度。这个实验证明，与导热垫片相比，洛德填缝胶具有更好的电池冷却性能。

之前的白皮书还指出，对组装电池模组还应考虑契合性效果，因为填缝胶可以更轻松地填充电芯和冷却板之间的不同公差缝隙。制造零件的缝隙公差由客户指定，公差越小，模组和电池组的成本越高。对于大型电池组，焊接或固定会使金属变形，进而出现大小不一的缝隙，而热界面材料就需要契合这些缝隙。液态导热填缝胶不受基材形状和体积的限制，可以填充所有缝隙；而导热垫片会受到基材厚度和机械硬度的限制。图2展示了这种效果。

## 实验

表1列出了本研究中使用的填缝胶和导热垫片关键属性。选择与CoolTherm SC-1200和SC-1500具有相当导热率和硬度值的导热垫片，导热垫片厚度为1mm。

洛德与位于美国科罗拉多州丹佛市的国家可再生能源实验室(NREL)合作，NREL为测试方案的设计及模型建立提供了支持。NREL推荐采用三星SDI方形电池(94 A·hr, 4.1 V)的五模组，其与BMW i3电动汽车使用的电芯相同。所有电芯同一面的顶部、中部和底部都安装了热电偶(参见图3a)。模组中央电芯在同一面的顶部、中部和底部另安装了两个热电偶(参见图3b)。

将液冷热交换器连接到涂有厚度为0.003英寸绝缘环氧涂层(JMC-700K)的铝板上，交换管与金属板之间涂有导热膏(CoolTherm TC-404 导热脂，4.3 W/m·K)。冷却液为50/50的乙二醇/水混合物，并通过容积泵将体积流速变化控制在1%以内。

将填缝胶点到涂有JMC-700K的板上(参见图4)，并将五个电芯压入液态填缝胶中，然后从侧面和从上方以4psi的压力夹紧到位。在电芯边缘下方使用1mm厚的Lexan限位，以控制缝隙(类似于用于其他模组的导热垫片厚度)。然后等待24小时，让填缝胶固化。对于使用导热垫片的模组，将垫片直接放置在冷却板上，并如上所述放置和夹紧电芯。对于不含导热界面材料的对照模块(以下简称对照模块)，将电池直接放置在涂有绝缘层的冷却板上。

为了模拟电池模组实际生产中出现的电芯和冷却板之间的缝隙，所有模组均在2号和4号电芯边缘下方装有(或未装)一个额外的1mm Lexan限位。

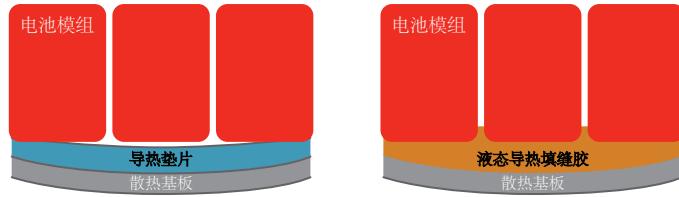


图2: 胶粘剂层厚度对导热垫片(左)和液态导热填缝胶(右)契合性的影响

表1: 本研究中使用的热界面材料列表

产品	CoolTherm SC-1200	CoolTherm SC-1500	导热垫片1	导热垫片2
供应商	Parker LORD			公司1
产品	液态导热填缝胶			导热垫片
标称厚度 (mm)	NA	NA	1	1
邵氏硬度	OO-85	OO-75	OO-45	OO-75
报告的 <sup>(a)</sup> 导热率 (W/m·K)	2.0	3.8	2.0	4.0
测量的 <sup>(b)</sup> 导热率 (W/m·K)	2.0	4.1	1.3	4.2
测量的 <sup>(b)</sup> 界面阻抗 (K·cm <sup>2</sup> /W)	1.9	0.8	4.3	4.1

(a) 供应商产品技术数据表提供的信息

(b) 如之前的白皮书所述，通过ASTM D5470测量<sup>1</sup>

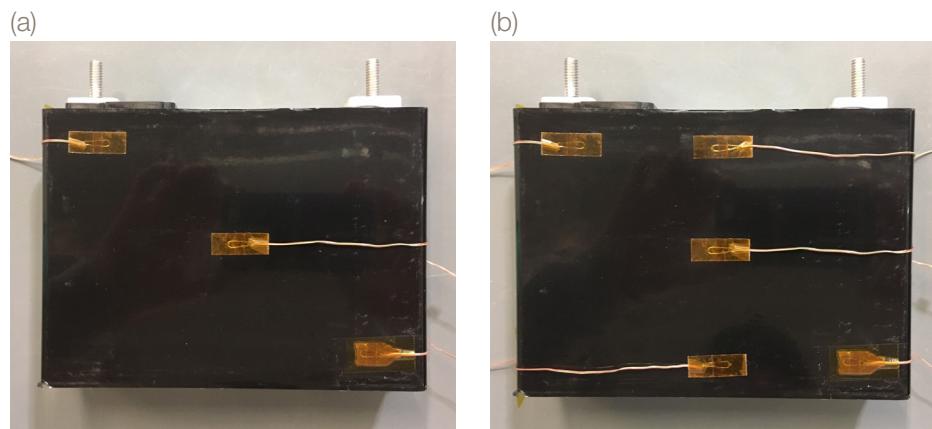


图3: 外侧四个电芯热电偶分布 (a) 中央电芯上的热电偶 (b)



图4: 使用洛德填缝胶将电芯组装到冷却板上

无热界面材料的对照模块也装有（或未装）限位。对电芯施加4psi的恒定压力，并将电芯向下压到冷却板上。图5显示的是完成组装的模组。

串联电芯并使用1.5C快速充电循环充电。在充电循环期间，每隔2秒监测并记录下热电偶温度以及冷却液入口和出口温度。通过质量流速 $\dot{m}$ 、冷却液比热容 $C_p$ 以及出口和入口冷却液的温度差 $\Delta T$ 确定冷却液排出的电池模组热量 $P_{coolant}$ ，如公式(1)所示：

$$P_{coolant} = \dot{m}C_p\Delta T \quad (1)$$

此外，进行单独的量热测量以测定操作期间电芯的总体温度。在无冷却液流量的滴落量热法中进行测试，以计算电池模组的比热容并测量1.5C快速充电循环期间模组所产生的热量。在对引线和对流消耗的热量进行校正后，在每个时间点计算电池的整体温度。可根据要求获得详细计算。

## 结果和讨论

在快速充电条件下测试不同模组的热性能。在本测试中，对应于模组1.5C充电速率，施加了150A的恒定电流，直到达到电压极限。由于在充电过程中五个电芯无法实现完全地电气平衡，因此必须在初始充电后以短时间为增量，施加较低电流，以达到模组100%充电状态。图6显示了典型的充电循环和所产生的电压响应。

在充电循环期间，通过测量冷却板出口处冷却液的升温和情况测定每个模组排出的总热量；并使用这一值，结合已知的冷却液流速和冷却液比热容计算传递给冷却液的热量[参见公式(1)]。图7和图8显示了这些数值随时间变化的曲线。排出热量值越高说明热界面材料效率越高，电池模组冷却越多。

图7a显示了 CoolTherm SC-1200 填缝胶（2 W/m·K）、2 W/m·K 导热垫片以及不含热界面材料的对照模块中冷却液排出的热量。在没有模拟公差存在的情况下，各研究对象峰值处数值显示：填缝胶比对照模块多排出了约62%的热量，比导热垫片多排出了约24%热量。在2号和4号电芯处增加1mm限位的情况下，填缝胶性能几乎不受影响，而导热垫片和对照模块性能均显著下降。在这种配置中，填缝胶排出的热量是对照模块的两倍，比导热垫片多排出47%的热量。这可能是因为液态导热填缝胶能够良好契合电芯冷却板上的不规则表面，这与我们之前白皮书所预测的情况一致（参见图2）。

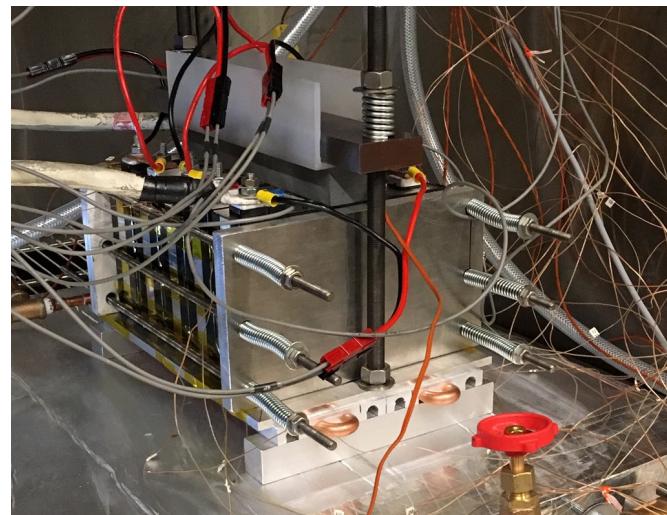


图5：完成组装的模组

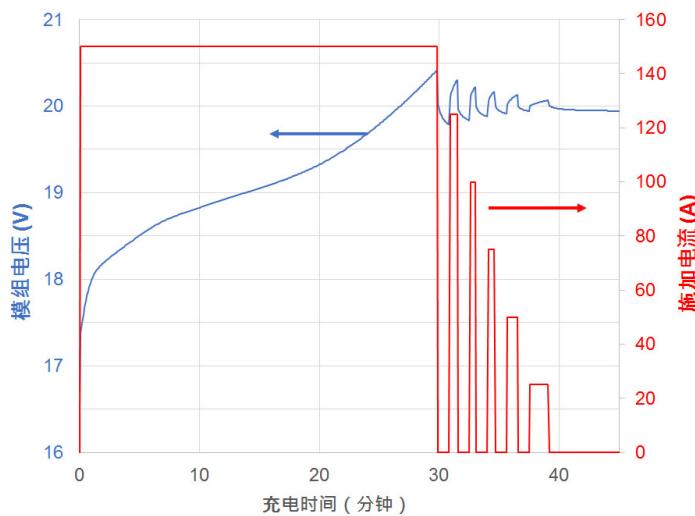


图6：快速充电循环过程中对电池模组施加的电流以及所产生的电压响应

图7b显示了 CoolTherm SC-1500 填缝胶（4 W/m·K）和4 W/m·K导热垫片之间类似的比较情况。在无限位的情况下，各研究对象峰值处数值显示：填缝胶比对照模块多排出了约70%的热量，比导热垫片多排出了约27%热量。在使用限位的情况下，CoolTherm SC-1500 填缝胶的性能与2 W/m·K 填缝胶大致相同；但与带限位的2 W/m·K 导热垫片和不带限位的对照模块相比，4 W/m·K 导热垫片的性能更差。我们认为这是因为4 W/m·K 导热垫片的硬度更大，使其无法契合各个电芯和冷却板之间不均匀的缝隙，因此其性能比2 W/m·K 导热垫片差。我们之前的研究中也观察到类似情况：4 W/m·K 导热垫片的热阻与2 W/m·K 导热垫片的热阻几乎相同（参见表1），但由于4 W/m·K 导热垫片具有更高的硬度，其无法通过施加压力使性能得到改善。

图8和图7比较了相同形式的导热材料，显示了相同的数据。图8a表明导热填缝胶之间性能相似，不论是否存在限位。与图8b显示的导热垫片相比，图8a还表明：无论热导率或模组配置如何，两种填缝胶在散热方面均优于性能最佳的导热垫片。具体来说，即使是带有限位的2 W/m·K 填缝胶也会比没有限位的4 W/m·K 导热垫片的性能更佳。此外，在添加限位后，两个导热垫片的契合性更弱，导致了更差的性能；而填缝胶两种配置之间的差异非常小。

除了测量散热量，我们还用两种方式评估了电池模组的温度性能。首先，分析来自安装在各个电芯的热电偶的温度数据。图9显示了各个电芯顶部、中部和底部的热电偶读数和时间曲线，以及五个热电偶各个位置的平均值，同时基于前面的图表显示了两个最极端的情况。图9a和图9b分别显示了不使用限位楔子时4 W/m·K 填缝

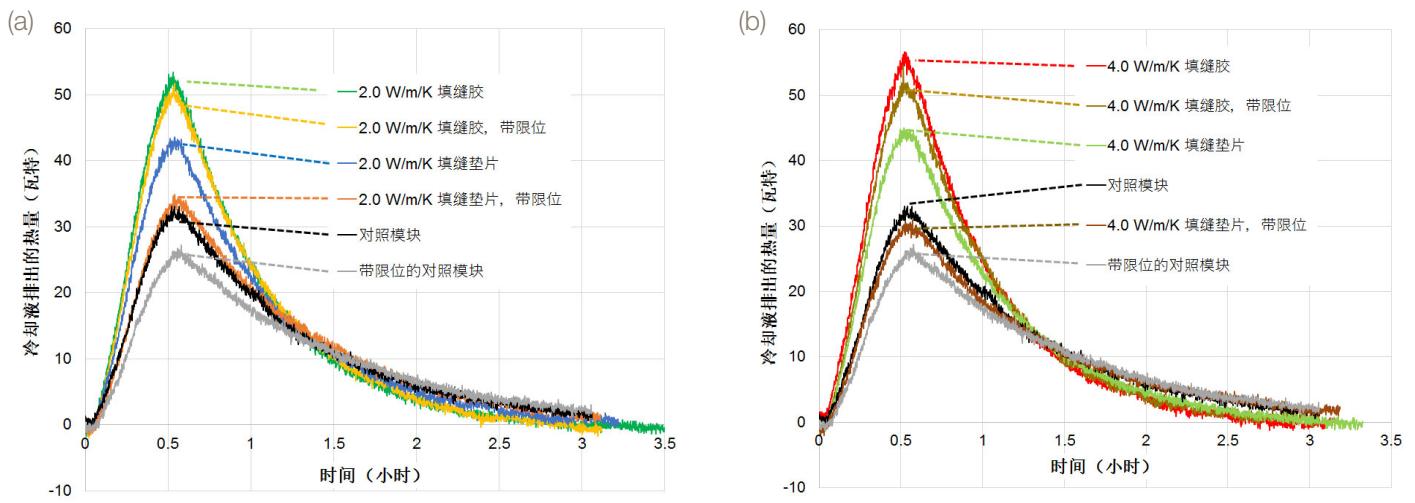


图7: 比较2 W/m·K 材料 (a) 和4 W/m·K材料 (b) 从不同模组配置中排出的热量。对照模块无热界面材料。注意, 图例顺序与每种材料的最大峰值相对应。

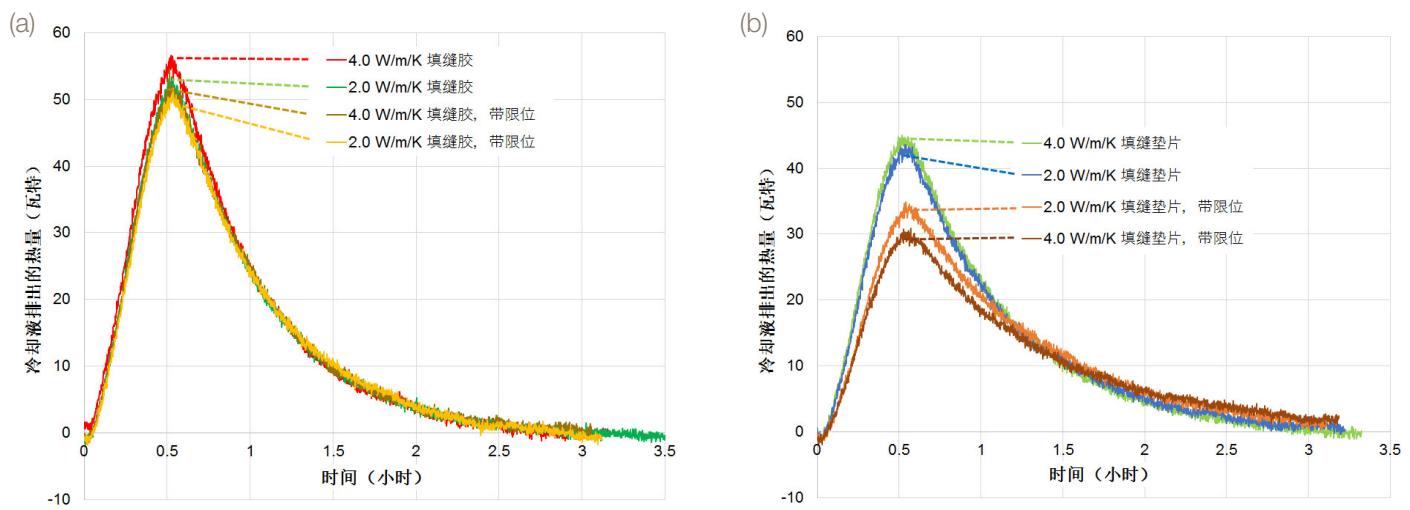


图8: 比较 CoolTherm SC-1200、SC-1500 (分别为2和4 W/m·K) 填缝胶 (a) 和导热垫片 (b) 所排出的热量。注意, 图例顺序与每种材料的最大峰值相对应。

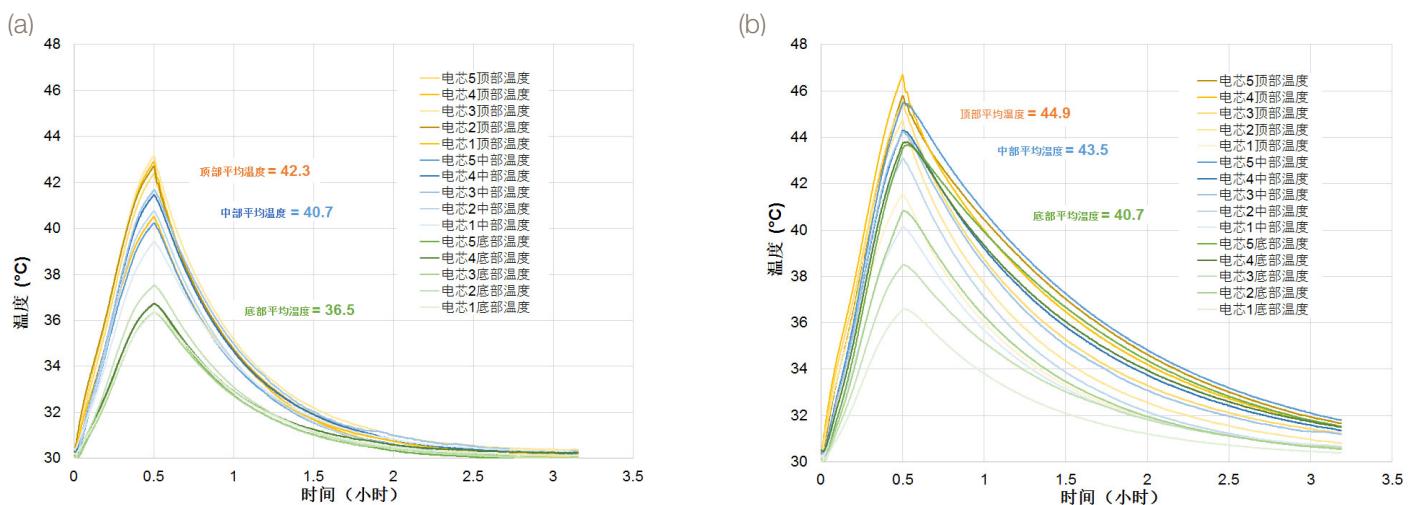


图9: 比较 (a) 不含限位的 4W/m·K 填缝胶和 (b) 含限位的 4W/m·K 导热垫片的电芯热电偶温度。图表显示了五个电芯的各个曲线以及顶部 (橙色)、中部 (蓝色) 和底部 (绿色) 热电偶的平均值。

胶的数据，以及含限位的4 W/m·K导热垫片的数据。在这两种情况下，冷却板（底部）附近的温度总体最低，引线端（顶部）的温度最高。导热垫片的温度读数存在较大差异，且正如预期的那样，导热垫片的总体温度较高，但填缝胶和导热垫片之间的最高温差仅为约4°C（分别为43°C和47°C），即使从热量传输的角度，这些也是最极端的情况。

注意，热电偶仅捕获电芯外侧壳体的温度。但热量主要来源于电芯内部，并且我们不了解电芯内部的热传递特性。大部分热量可以通过电芯内部直接传递至电芯底部，穿过热界面材料并进入冷却板。因此，我们设计了第

二个实验，以根据等式(2)和测量的热量，计算特定时间点  $t_i$  处，电池模组的总体温度  $T_i$ ；其中括号中的第一项是从电芯中排出的热量（对端子引线和对流引起的热量损耗进行了校正）， $m$  是电池的质量， $Cp$  是通过滴落量热法实验测定的电池比热容。

$$T_i = (P_{battery} - P_{coolant} - P_{convection} - P_{leads}) * (t_i - t_{i-1}) / (m_{battery} * Cp_{battery}) + T_{i-1} \quad (2)$$

图10汇总了计算的各种模组配置的总体温度与时间的关系。图表显示，温度值越低，热性能越好。由于这些数值以图7-8中的散热数据为基础，因此结果与前面讨论的相同。

图11汇总了使用这两种方法测定的峰值温度的平均值。图11a显示了通过顶部、中部和底部热电偶温度测量值确定的电芯总平均峰值温度。误差条表明所有温度具有95%的置信区间，包括顶部和底部温度之间的变化。图11b显示了以图10为基础的峰值温度曲线，表明了电芯的整体平均温度（包括整个电芯而不仅仅是表面温度）。正如预期，总体温度高于热电偶温度，但保持了相同的总趋势：填缝胶的温度最低，给定类型材料2和4 W/m·K之间的总体差异极小，并且与导热垫片相比，是否添加垫片对填缝胶的效果影响不显著。

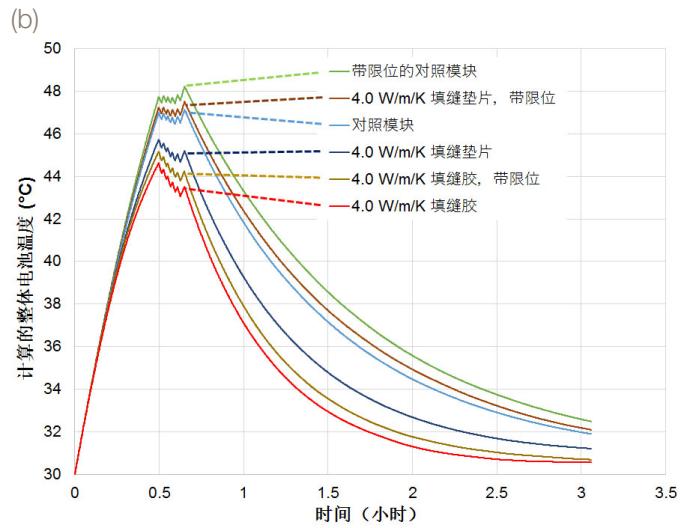
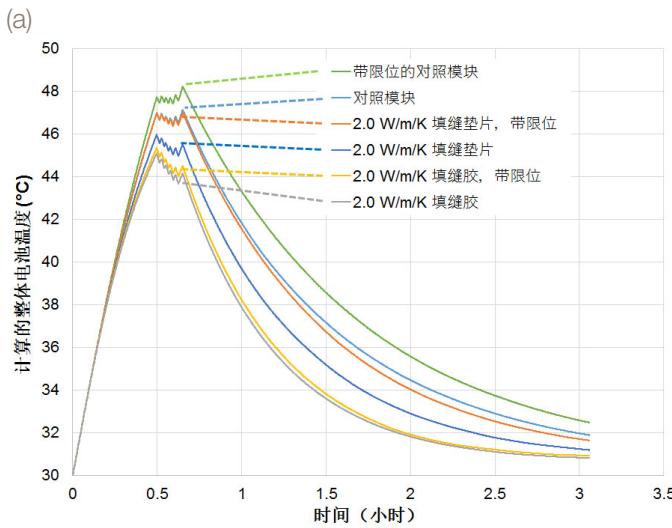


图10: 比较采用2 W/m·K材料(a)和4 W/m·K材料(b)模组的计算的总体温度。对照模块无热界面材料。

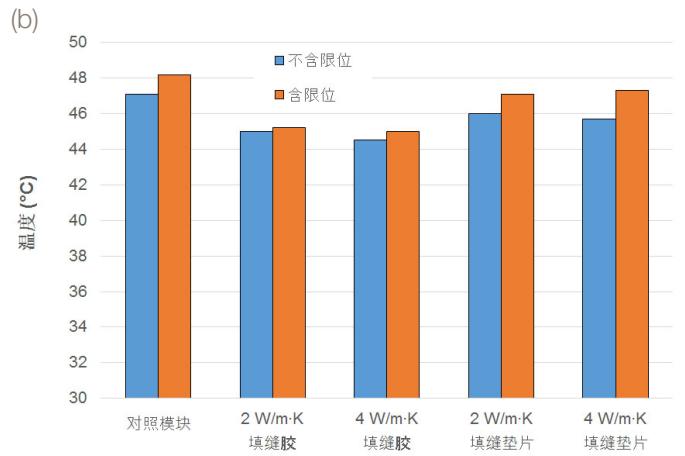
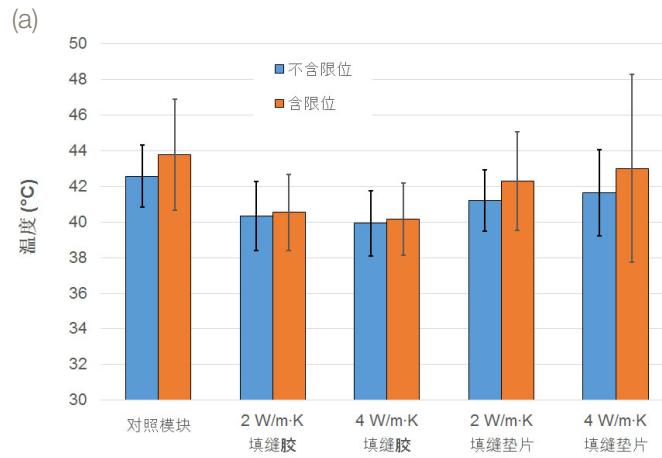


图11: 基于各个热电偶测量平均值的电芯总体平均最大温度(a)以及不同电池模组配置基于量热计和热量测量值(b)计算的电芯总体最大温度。图11a中的误差条对应于95%的置信区间，包括各个电芯顶部、中部和底部的测量值。

## 结论

我们的研究结果表明，与导热垫片相比，液态导热填缝胶具有显著的性能优势，可以有效排出电池模组的热量并降低其温度。液态导热材料能够填充因表面粗糙度和制造工艺导致的不规则缝隙，为电池模组提供均匀且一致的性能。我们之前的白皮书中已经发现了这一事实，其指出：由于填缝胶具有较低的界面热阻，因此它的热阻远低于导热垫片。如果使用得当，即使是具有较低导热率的填缝胶也可以胜过具有更高导热率的导热垫片。

我们的结果还表明，即使使用具有相对较低导热率的填缝胶，也可以获得出色的热性能。随着热负荷的增加，填缝胶的导热率越高，其性能优势就更加明显。CoolTherm 液态导热填缝胶不仅拥有超凡的热性能，还具有优异的固化速度和易用性，使其成为大批量汽车制造工艺的理想之选。

## 致谢

我们衷心感谢马萨诸塞州丹佛市国家可再生能源实验室（NREL）的 Matthew Keyser 和 Thomas Bethel 在数据规划、实施和分析方面提供的宝贵帮助。

