



液态导热填缝材料与导热垫片

导热性能的对比研究
白皮书

液态导热填缝材料与导热垫片

导热性能的对比研究



Tim Fornes - 首席科学家



Eric Wyman - 全球首席应用工程师



Alaina Hull - 资深科学家I

摘要

电池充放电过程中产生的热量的有效管理是高能量密度锂离子电池组的核心因素之一。热界面材料 (TIM) 是用来连接电池或电池模组和散热片的材料，主要用于填补两种材料接合或接触时产生的微空隙及表面凹凸不平的孔洞，提高器件散热性能。电池制造商经常用的TIM材料有原位固化的液态可分散的导热填缝材料和已预固化的导热垫片（也称填缝片），两种材料各有其优缺点。本研究的目的是比较CoolTHERM® 导热填缝材料和导热率相当的某市售产品导热垫片的热阻。本次和今后的应用研究数据会使设计者开发出更高效和成本合理的电池组。

介绍

在运输领域中，电动汽车(EVs)是今后发展的主要方向之一。为使电动汽车在市场上赢得更多的份额，目前的主要趋势是扩大电动汽车的行使里程和增强性能，使之与目前内燃机汽车性能类似。这就迫使电池组工程师必须增加电池能量密度。增加能量密度意味着在更小的空间中会产生更多的热量，因此热管理就成为电池组性能和设计的关键指标之一。

图1显示了电池组吸收或释放热量的三种方式，即辐射、对流和传导。在电池组和冷却板之间的传导是在EV电池组最广泛使用的方法。传导传热的限制因素是电池模组和散热片等部件之间的界面。如图2所示，虽然这些部件的表面肉眼看上去非常光滑平整，但实际上在微观尺度上是粗糙的。

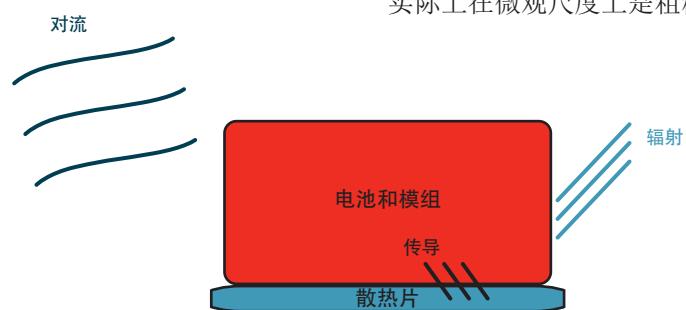


图1: 电池或电池模组内的传热方法

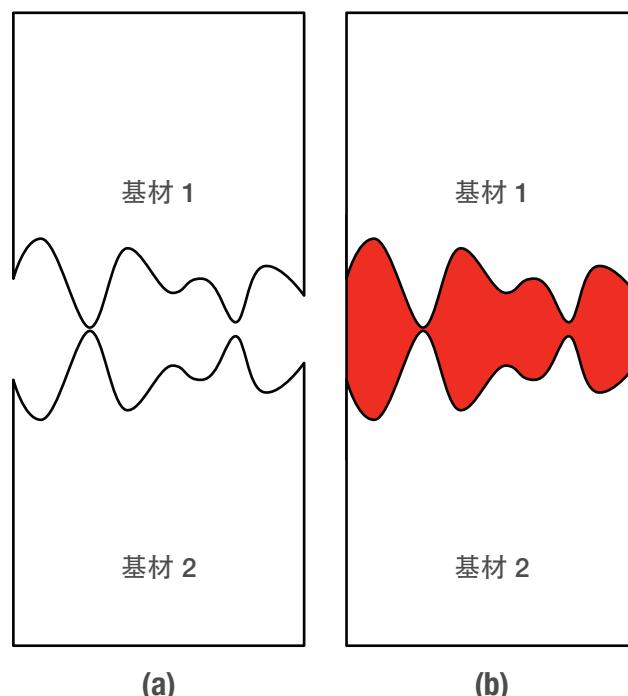


图2: 固体表面之间空气(a) 和 (b)TIM填充的界面微观描述

表面粗糙导致只有小部分的表观表面彼此直接接触，从而包含了空气。为了解决该问题，如图2 (b) 所示，使用TIMs材料连接界面，取代空气，从而可以更好的填充微观上粗糙的界面。同样重要的是，TIMs可以提供良好的电绝缘性能，以防止在高能量电池和常用的金属散热器之间发生高压击穿。

电池制造商通常使用液态点胶原位固化导热填缝材料或导热垫片中的一种。但二者的工艺有着很大的不同。导热填缝材料，需要先使用计量混合设备混合，然后涂胶到一个基材表面，加压上另外一个基材，压缩到设定厚度。然后使材料固化，形成柔顺的固体界面。相反的，导热垫片需要先固化成型，然后切割成一定形状，放置在两个基材之间，压缩到设定厚度，并固定到位。施加一定的压力可以使柔顺的导热垫片与粗糙的基材表面紧密接触，但是同时也会对其热阻有一定的影响。

鉴于导热填缝材料和导热垫片的固有的应用上和物理上的差异，可以对两种材料在两种固体基材上的稳态传热特性进行比较。在本研究中，通过对三明治结构的金属-TIM-金属的热阻的测试，对比洛德的CoolTherm和导热率相当的市售导热垫片的热阻。本次研究和今后的研究数据会使设计者开发出更高效和成本合理的电池组。

传热术语和定义

在讨论本次研究的实验方法和结果之前，首先对热界面材料的常用传热术语和定义进行简要的描述。热量从热基板转移到冷板的能力将由热界面材料的热阻控制。这个热阻可以由下列方程定义：

$$R = \frac{\Delta T}{Q}$$

式中： R 是热界面材料的热阻，单位是 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ； ΔT 是热板和冷板间的温度差，单位是 $^{\circ}\text{C}$ ； Q 是热源的功率，单位是 W 。注释：温度的单位还可用开尔文 K 表示。更常见的是界面热阻的定义，它与上述热阻方程非常相似，但考虑了热流。

$$\theta = \frac{\Delta T}{Q/A}$$

式中： A 是界面的横截面积，单位是 m^2 。

热界面材料的热阻反映了两个性质，热界面材料在基板的离散界面上传递热量的能力（或不可操作性）和热界面材料本身的热导率。可以用下面公式表示：

$$\theta = \theta_i + \frac{t}{k}$$

式中： θ 是热界面材料胶层的热阻； θ_i 是热界面材料胶层顶界面和底界面的界面热阻； t 是热界面材料胶层厚度； k 是热界面材料的热导率。实际上，热界面材料的热阻是通过测量给定稳态热通量时的 ΔT 来确定。如图3所示，导热率和界面热阻可以通过测量一系列TIM胶层厚度的热阻来确定。如前所述，这些单独的参数在评估热传递在离散界面上以及通过TIM本身的体积方面是特别重要的。例如：一种高导热率的热界面材料在较薄的粘接厚度时，仍会具有较高的热阻。这往往是因为TIM材料与一个或两个基材的物理接触不良，因而得到较高的界面热阻 θ_i 所导致。正是由于这些原因，才需要比较导热填缝材料和导热垫片的热阻性能。

实验

表1列出了导热填缝材料和导热垫片在本研究中使用的关键性能。选择了与CoolTherm SC-1200和SC-1500导热填缝材料具有相当热导率和硬度的市售导热垫片。

依照ASTM D5470标准，使用安赛斯科技有限公司（Analysis Tech）的TIM1400热阻仪来进行测试。因为铜对金属-TIM-金属测量具有非常小的热阻贡献，所以选择铜作为模拟散热器的金属表面。因为铜对金属-TIM-金属测量具有非常小的热阻贡献，铜对热阻测量的贡献会从以下报道的数值中除去。

在分析测试前，导热填缝材料样品制备是配合直径33mm，厚度3mm的测试用的光滑铜盘。用手动点胶的方式将洛德CoolTherm SC-1200和SC-1500导热填缝材料点到铜盘上。起始厚度是3mm，通过改变压力来制备不同厚度胶层的铜-导热填缝材料-铜三明治结构，然后室温条件下固化。市售的导热垫片先切成33mm的直径，然后

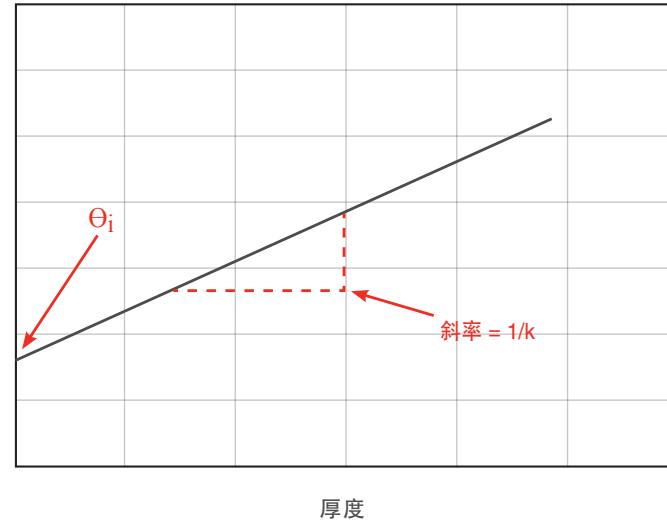


图3: 用热阻与厚度测量材料导热率 k (斜率的倒数)，和界面热阻 θ_i (y截距)

表1: 市售导热垫片与洛德导热填缝材料对比试验

产品	产品形态	厂商	热导率 (W/m·K)	表观厚度 (mm)	硬度
SC-1200	导热填缝材料	Parker LORD	2.0 ^(a)	NA	OO-85
SC-1500	导热填缝材料	Parker LORD	3.8 ^(a)	NA	OO-75
导热垫片 1	导热垫片	厂商 1	2.0 ^(b)	1, 2, 3	OO-45
导热垫片 2	导热垫片	厂商 1	4.0 ^(b)	1, 2, 3	OO-75

(a) ISO 22007 Hot Disk方法测试

(b) TDS数据，ASTM D5470方法测试

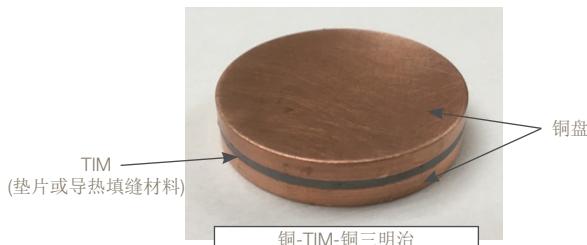


图4: 测试热阻用的铜-TIM-铜三明治结构样块

制成铜-导热垫片-铜三明治结构的测试样品。导热垫片的厚度与施加的压力决定了粘接胶层的厚度。图4显示了铜-TIM-铜三明治结构。

在测量TIM的热阻抗之前, 确定了在不同压力下铜盘和TIM测试板的界面的热阻。铜本身热阻由其厚度和报导的导热率398 W/m·K计算得出。压板界面的界面热阻是通过测量一个铜盘的热阻来确定的, 该铜盘在顶部和底部各用一滴200cSt粘度的硅油润湿。本实验在不同的压力下重复测试。然后从铜-TIM-铜样品中减去铜盘的体积热阻和测得的压板界面热阻, 得到TIM材料的热阻。

在TIM1400热阻仪器上, 在最低为50 kPa的压力下测试导热填缝材料热阻。在50-650kPa的压力下测试导热垫片的热阻。该压力范围有利于捕获广泛的载荷, 这些载荷可以用来实现良好的接触并给出最终的粘接胶层厚度。图5显示了铜-TIM-铜三明治型测试样块的图片。滴加少量的硅油在铜-TIM-铜三明治型和TIM400测试仪之间的界面上, 以确保空气被排除。

测试结果和讨论

首先比较一下四种材料的测试所得的热导率 (TIM1400热阻仪器测试结果) 和技术数据表 (TDS) 的值 (见表1)。TIM1400热阻仪器测试的测试方法是在50kPa 的压力下测试几种不同厚度的样品的热阻。得到热阻值和样品厚度呈线性关系(见图6)。斜率的倒数是测得的热导率, y轴的截距是界面热阻。详细测试结果见表2。就洛德的导热填缝材料而言, 三明治测试仪 (ASTM D5470) 和 ISO 22007 热盘测试仪的测试结果很接近。对于厂家1的导热垫片而言, 虽然导热垫片2 TIM1400热阻仪器测试结果和TDS接近, 但导热垫片1的TIM1400热阻仪器测试结果 0.7W/m·K 远低于TDS上的值。目前还不清楚具体原因, 可能因为厂家1在测量时用的压力大于50 kPa。厂家1没有在TDS上注明测试方法。

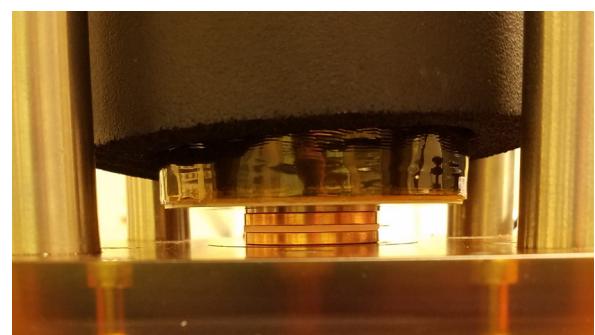


图5: ASTM D5470认证过的TIM1400测试仪上的铜-TIM-铜三明治型测试样块

表2: 测量的热导率和界面热阻-- 洛德液态填缝材料和市面销售固态导热垫片

产品	测量的热导率 - 斜率的倒数 (W/m·K)	测量的界面热阻 - y-截距 (K·cm ² /W)
SC-1200	2.0	1.86
SC-1500	4.1	0.75
导热垫片 1	1.3	4.31
导热垫片 2	4.2	4.10

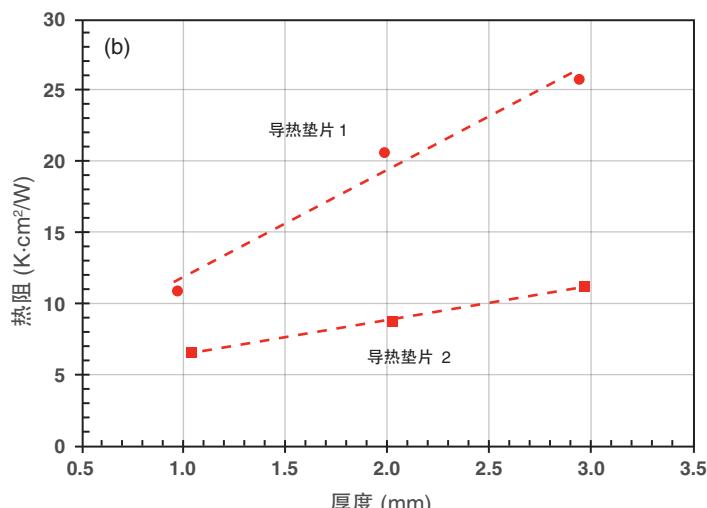
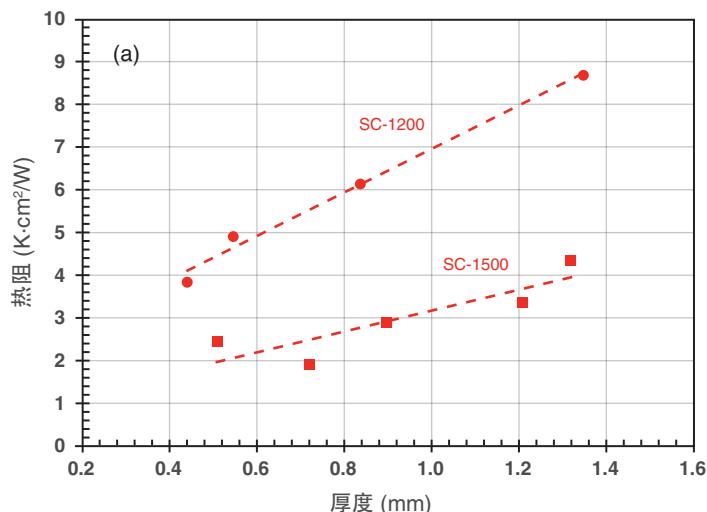


图6: 热阻 (a) 洛德导热填缝材料 (b) 市面销售固态导热垫片 (P = 50 kPa)

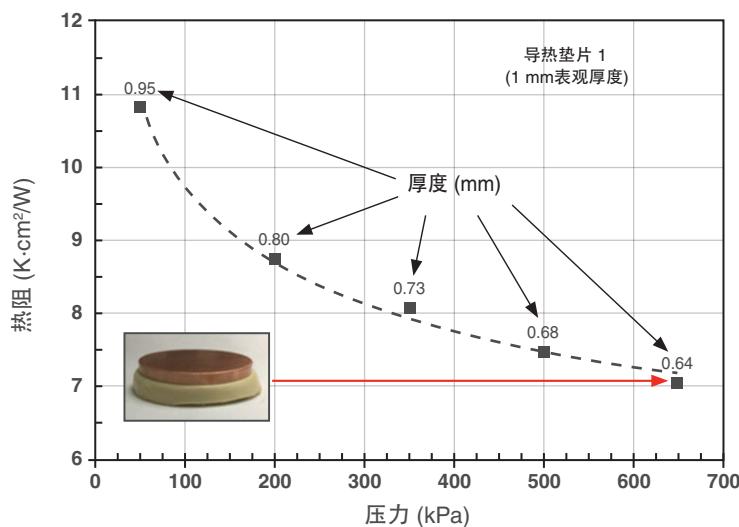


图7: 热阻vs压力--固态导热垫片1。右下角照片是650 kPa压力后样品的状态

从图6的y轴截距和表2数值还可以看出导热垫片和导热填缝材料的界面热阻的差异。导热垫片1的界面热阻比CoolTherm SC-1200的界面热阻高2.3倍，导热垫片2的的界面热阻比CoolTherm SC-1500的界面热阻要高近5.5倍。导热填缝材料界面热阻显著低于导热垫片可能由于导热填缝材料和界面的接触较好，进而降低了界面热阻。

再来看看压力对导热垫片1的厚度和热阻的影响（见图7）。正如预料，热阻和厚度随着压力增加而减小。但有时通过增加压力来减小热阻可能是不现实的。从图7可以看到，如果要得到接近于导热填缝材料CoolTherm SC-1200的热阻值（1mm/50 kPa压力），需要用650 kPa的压力将1mm导热垫片1挤压到0.64mm。高压力可能损伤电池包或散热板。

现在来比较导热垫片1和导热填缝材料 CoolTherm SC-1200的热阻和厚度的关系（见图8）。注明：导热垫片的厚度变化是通过持续挤压实现的。而导热填缝材料的样品厚度是固化前设计好的，样品测试时的压力固定为50kPa。这样比较是模拟实际应用。结果发现在同样厚度下，导热垫片的热阻比导热填缝材料高很多。主要归因于导热垫片的较高界面热阻（见表2）；然而导热垫片本身的热导率较低也会有影响。除此之外，对于表观起始厚度1mm导热垫片，厚度对热阻影响更明显。比如，表观厚度1mm的导热垫片1在1.2mm时的热阻比挤压到0.95mm时至少高3 K·cm²/W。

重点提示一下，图8所示的导热垫片1的y轴截距不代表界面热阻。界面热阻是要在相同的压力下测试几种不同厚度的TIM后得出。这里的测试是用渐近高压力挤压来获得较小的TIM厚度。这个过程也会导致界面热阻的变化。除此之外，增加压力也可能导致热导率变化。正如前面所述，增加压力的负面影响是压力可能超过需要冷却器件的载荷。

比较导热垫片2和导热填缝材料 CoolTherm SC-1500 热阻和厚度时，也可以得出类似的结论（见图9）。导热垫片的热阻明显高于导热填缝材料。另外厚度的影响更明显。比如，表观厚度1mm的导热垫片2 热阻增加 ~3.2 K·cm²/W，虽然厚度只增加 0.17mm。热阻的陡然增加是由于导热垫片2的模量比导热垫片1高很多。能覆盖缝隙范围较小。总热阻较高进一步体现导热垫片界面热阻比导热填

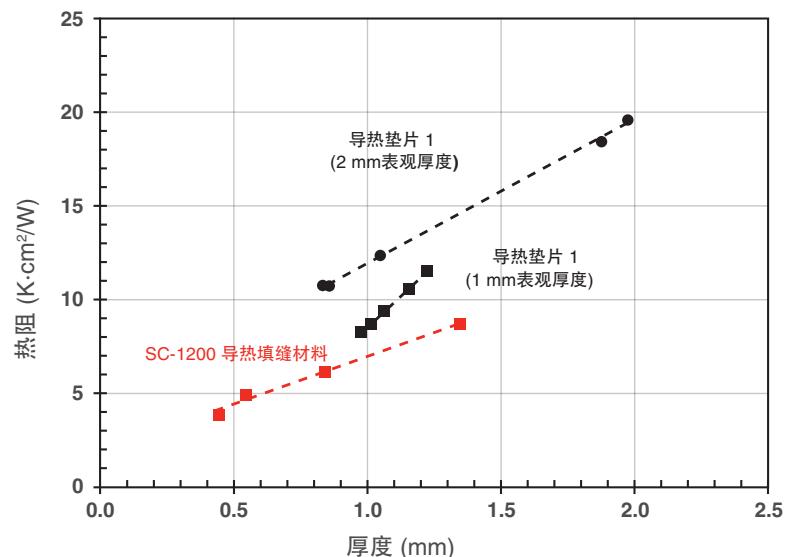


图8: 热阻vs厚度--固态导热垫片1 和 液态导热填缝材料CoolTherm SC-1200

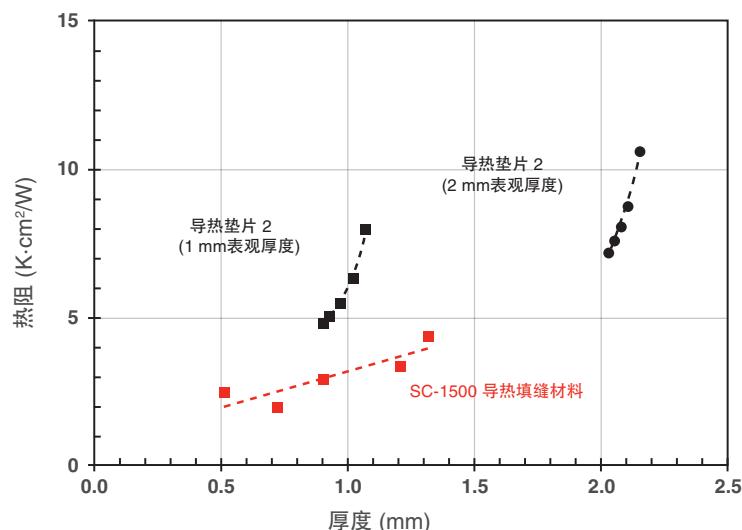


图9: 热阻vs厚度--固态导热垫片2 和 液态导热填缝材料CoolTherm SC-1500

缝材料界面热阻高。值得一提的是，在类似相同的厚度下，虽然导热垫片2材料本身的热导率大概是导热填缝材料CoolTherm SC-1200本身热导率的2倍，但实际测得的热阻很接近。

前面提到的导热垫片和导热填缝材料热阻的显著差别可以从TIM材料和粗糙表面的微观接触紧密度来解释。与固体导热垫片不同，液态导热填缝材料可以流进很小的缝隙，与界面紧密接触。给上下两个基板提供有效的导热渠道。图10示意两种不同状态的导热材料和表面的接触状况。

除界面微观紧密接触外，液态导热填缝材料很容易适应界面宏观上高度的变化。由于基板表面平面度和电池模块高度的公差，沿着界面高度变化几毫米是很正常的。而导热垫片在这方面是有局限的，主要由于导热垫片的厚度是固定的和在组装时需要压力。除此之，沿着界面压力变化很大，导致局部区域热阻的差别，进而造成局部过热。然而液态导热填缝材料不需要很大压力就可填充较大缝隙。可以避免较大外界压力对设计的影响，界面热阻也会比较均匀。图11示意，当界面有明显不平时，导热垫片和导热填缝材料与不平表面的接触情况。这种现象在EV电池组装会看到。

除热传递不同外，生产流程也有区别。导热垫片需要裁剪到实际需要的形状或尺寸。有些残余部分不适合再用造成浪费。另外，由于需要更好填充微观缝隙，倾向于用较低Tg(玻璃转移温度)的聚合物制造导热垫片。导致垫片表面有粘性，需要防粘衬垫。还有，EV电池包的面积较大，用导热垫片给自动生产带来困难。液态导热填缝材料很适合大批量自动化生产如果采用计量，混合，分配系统(MMD)。用液态导热填缝材很容易根据设计调整点胶方法。表3详细总结导热垫片和液态导热填缝材料的优缺点。

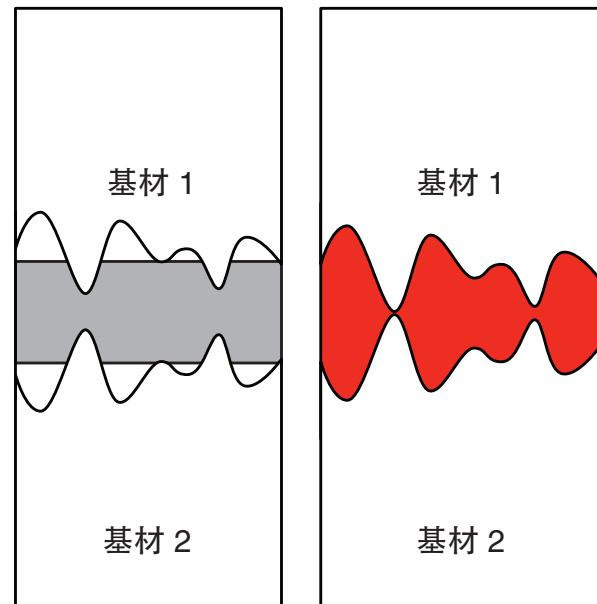


图10: 表面接触紧密程度示意图 (a) 固态导热垫片 (b) 液态导热填缝材料



图11: 接触面厚度不均匀界面接触示意图—固态导热垫片 (左) vs 液态导热填缝材料 (右)

结论

稳态热分析显示，与具有相近热导率和厚度的导热垫片相比，洛德液态导热填缝材料提供较低的热阻。主要原因是液态导热填缝材料容易流动到粗糙表面的小缝隙，与相邻界面接触较好。降低界面热阻。这个效应尤其体现在1mm厚的CoolTherm SC-1200和导热垫片2上。虽然SC-1200热导率比导热垫片2小两倍，分别是2和4W/m·K，但它们的热阻相近。由于较好的导热性能，容易使用，不需大压力，适合高度差别较大的界面和低成本，液态导热填缝材料应该是TIM首选。

表3: 导热垫片与导热填缝材料主要性能的比较

比较	导热垫片	液态导热填缝材料	详情
相对成本	高	低	由于导热垫片需要裁剪，浪费残余部分。
散热	好	更好	液态导热填缝材料可以流动到粗糙表面和热管理系统的缝隙里。界面热阻较小。固化后的导热填缝材料分子链呈网状结构。可以改善甚至消除界面析出和TIM移出。
界面有气泡	经常	可忽略	
设计灵活性	固定	非常灵活	液态导热填缝材料的硬度和工作时间可以通过改变混合比例来调整。 液态导热填缝材料点胶位置和方式可以灵活到定点点胶。 不像液态导热填缝材料，导热垫片的热导率对由于表面高低不平造成的局部压力差很敏感。
返修	可能	可能	两种导热材料都能返修。但与导热填缝材料比，导热垫片跟界面接触紧密程度差，更容易返修。 固化后，清除导热填缝材料需要时间和辅助用具，导热垫片可以整张拿下。
生产过程	较难	容易	大面积应用导热垫片很容易产生气泡。 用导热垫片自动化生产较难。 液态导热填缝材料需要MMD 仪器，但很容易自动化生产。

