

碳和石墨在热管理中的工业应用

GrafTech International 公司设计和生产的碳和石墨产品广泛应用于包括工业感应炉和消费电子产品在内的众多领域。仿真分析是针对其产品进行设计和工艺优化的关键。使用仿真可以在控制能耗和材耗的同时,最大程度地提高产品性能。

作者 JENNIFER SEGUI

为特殊热管理应用识别并设计最佳材料,是一项具有挑战性的任务。工业设计师们往往可以从供应商那里获得无数种材料供选择,但帮助他们做出明智决定的信息却非常有限。

GrafTech International 公司(以下简称 GrafTech 公司)的研究人员和工程师十分重视对自己公司产品的深入了解,因为这有助于为他们的客户提供充分的信息,帮助客户选择最佳的碳和石墨解决方案。

“为了更好地理解我们的产品及其在特殊热管理应用中的工作原理,我们一直将数值仿真与物理测试结合起来使用。” GrafTech 公司创新技术部门的资深研究员 Richard Beyerle 介绍道,“我们正在开发的最新计算工具可以帮助我们的销售工程师、现场专员及客户在进行实际安装和测试之前,对比不同产品在虚拟样机中的表现。”

图 1 显示的仿真 App 应用程序便是此类工具的一个示例。这个仿真 App 为底层的数学模型提供了友好的用户界面,使得与之相关的任何人都可运行仿真分析。

数值仿真,或者更为确切地说是

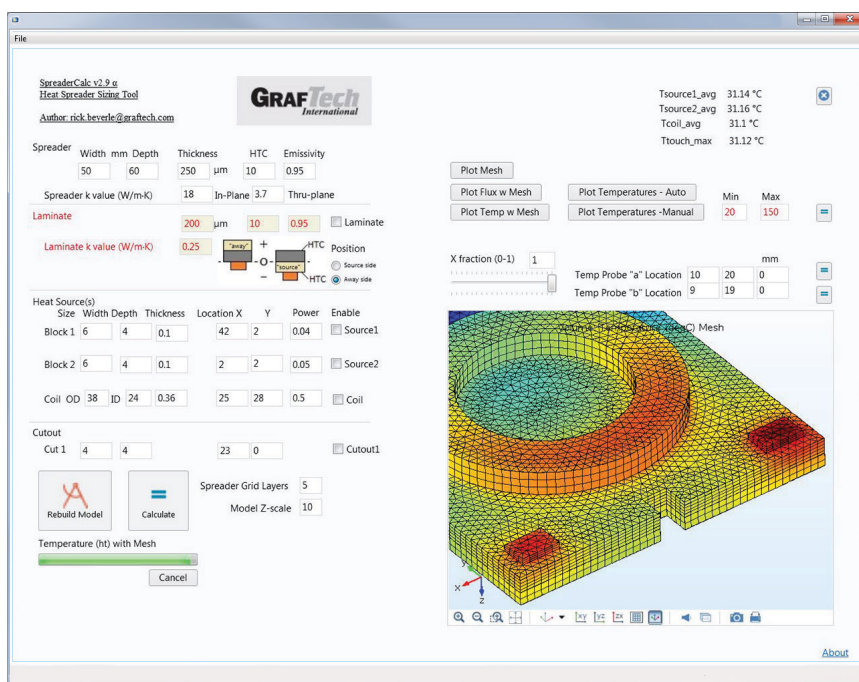


图 1. 仿真 App 为一个底层数学模型提供了用户友好的界面,将模型的使用范围扩展到更广泛的用户群。用户可以借助图中的仿真 App 来比较用于消费电子产品中进行散热的石墨箔的传热性能。图片由 GrafTech 公司提供。

多物理场建模,正在整个创新技术部门普及开来。GrafTech 公司的创新技术经理 Ryan Paul 说:“事实上,我们所有的产品和应用都受益于多物理场仿真。” Beyerle、Paul 以及资深研究员 Nathanael May 都在他们各自的工作中使用多物理场建模和仿真 App 来更

深层次地理解碳和石墨在电气、结构及热力学方面的性能,并针对多种工业应用中的设计和工艺进行优化。

» 了解碳和石墨

GrafTech 公司基于碳和石墨制造的先进材料解决方案呈现多种物理

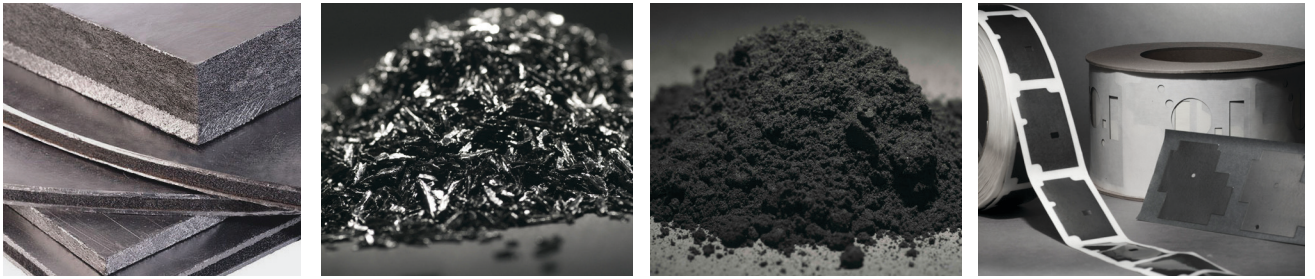


图 2. GrafTech 公司设计制造的先进材料解决方案包括刚性复合板、膨胀石墨片、粉末和柔性石墨箔，以及许多其他定制产品。图片由 GrafTech 公司提供。

“我们正在开发的“仿真 App”还可以帮助我们的销售工程师、现场专员，以及客户比较产品在虚拟样机中的工作性能。

— RICHARD BEYERLE, GRAFTECH INTERNATIONAL 公司资深研究员

形态，包括刚性片材、卷材、粉末、柔性箔以及定制加工结构单元等，图 2 展示了其中的几种形态。图 3 中对无定形碳和石墨的微观结构进行了比较，两者的主要化学成分均为碳元素。相对于无定形碳而言，石墨由许多平面层组成，并且结构高度有序。在单层石墨中，可以观察到蜂巢状的晶格，这是由于碳原子之间的共价键形成了六方晶系。

与无定形碳相比，石墨的结构使其具有极佳的面内电导率和热导率。同时，石墨也十分坚硬，单层石墨（称为石墨烯）是目前已知的最硬的材料。然而，石墨各层之间是通过范德华力这种弱的结合力相互键合，这导致各平面间的电导率和热导率较低，这也使得石墨材料的属性具有高度的各向异性。石墨中每一层之间都

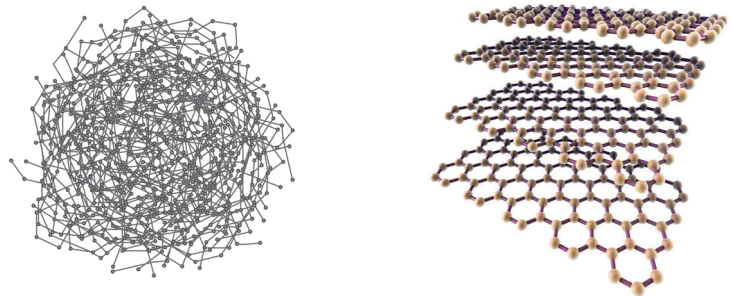


图 3. 与无定形碳（左图）相比，石墨具有高度有序的结构，它由许多单独的石墨烯层组成（右图）。

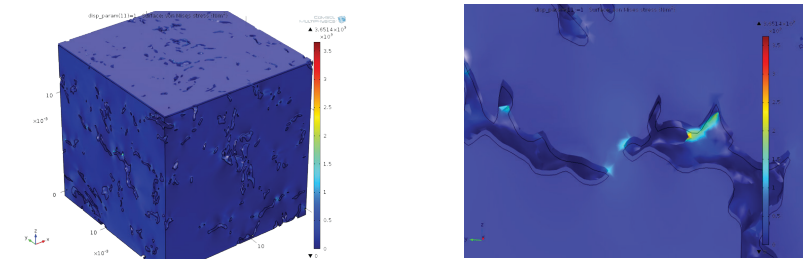


图 4. 使用计算机断层扫描 (CT) 生成可显示材料孔隙率的石墨重建体，并导入 COMSOL® 软件中进行仿真。经过验证的模型将用于研究合成石墨的孔隙率对其弹性属性的影响。图像由 GrafTech 公司提供。

能相互滑动，这使得这一材料相对比较柔软。许多形态的石墨都能在无氧条件下承受 3000 °C 以上的高温。

为了能够在热管理要求较高的工艺中使用石墨并有效利用其独特的热力学特性，我们需要更深层次地

了解材料的整体性能。为达成此目的，GrafTech 公司正结合物理测量和 COMSOL Multiphysics® 软件的仿真能力来研究材料的物理性能，其过程如图 4 所示。

“产品设计中面临的挑战是：在

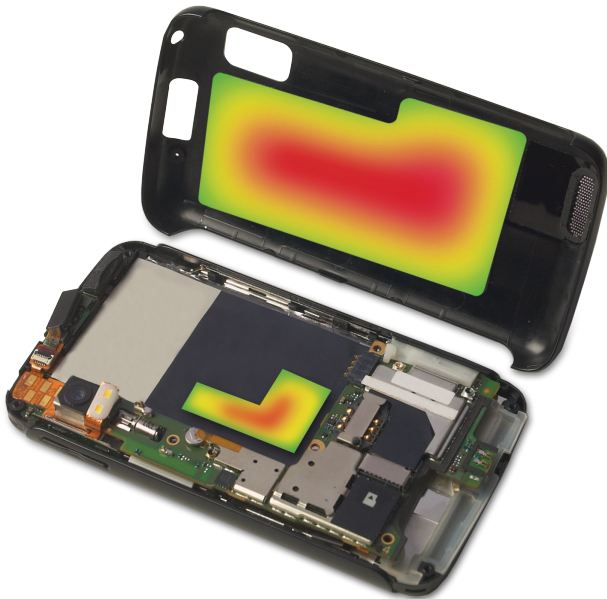


图 5. 由于具有很高的面内导热率, 柔性石墨箔散热片可对电子元件进行散热, 同时又因为层间导热率低, 可以保护底层的热敏区域。照片由 GrafTech 公司提供。

箔诸多的应用中, 具有代表性的是 SPREADERSHIELD™ 散热片, 这是专门针对智能手机、平板电脑和显示器等多种不同产品的散热需求而设计的材料。图 5 展示了石墨箔散热片如何对电子元件或设备进行降温, 使它们能在较低的温度下工作, 从而延长其使用寿命并提高性能。

石墨箔散热片有多种参数可供选择, 如厚度、电导率、热导率、接触阻抗及不同的涂层。“一个常见的难题是: 如何平衡石墨箔的热力学性能和生产成本。” Beyerle 说, “数值仿真可以极好地评估石墨箔在特定设备中对电子元件的散热效率, 因此让我们能够在不影响性能的前提下为客户提供成本最低的解决方案。”

为了评估柔性石墨箔在传热性能方面的各向异性, 及其在多种电子设备中的热管理应用, Beyerle 正在使用 COMSOL Multiphysics® 软件开发数学模型和仿真 App。使用仿真 App, 用户就能评估应用于便携式电子设备(如手机)的石墨散热片的几何特征(仿真 App 界面在图 1 中已作介绍)。

用户可以通过这个仿真 App 更改热源、插槽和其他开口的位置和尺寸, 还能指定热源功率, 以及对有限元网格和仿真结果进行可视化预览。图 6 显示了更改插槽长度对附近热源散热情况产生的影响。

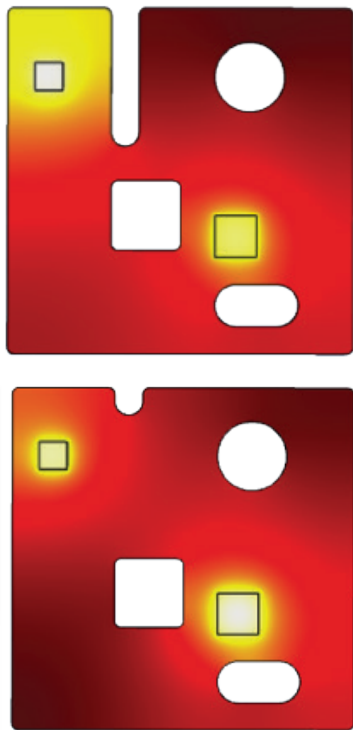


图 6. 使用 GrafTech 公司的仿真 App, 可以评估整个石墨散热片的散热情况, 同时还可以考虑热源的大小和位置, 以及缺口的大小。图像由 GrafTech 公司提供。

动态的热力学-力学-电学负载下, 对石墨随温度变化的属性和性能进行建模,” Paul 解释道, “通过对石墨及其应用进行建模, 我们获取相关知识的速度明显加快, 同时还帮助我们基于对物理机制和理论的更深理解进一步设计了实验, 这些成果是仅靠一些实验数据所远不能及的。”

» 模拟石墨箔为电子器件散热

针对石墨在电子元件热管理中的潜在应用, GrafTech 公司设计并制造了厚度极小的柔性石墨箔。在石墨

“通过对石墨及其应用进行建模, 我们获取相关知识的速度明显加快, 同时还帮助我们基于对物理机制和理论的更深理解进一步设计了实验, 这些成果是仅靠一些实验数据所远不能及的。”

— RYAN PAUL, GRAFTECH INTERNATIONAL 公司创新技术经理

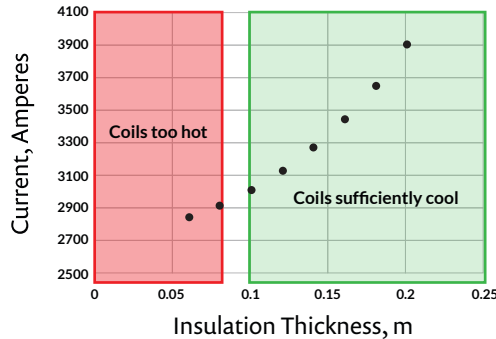
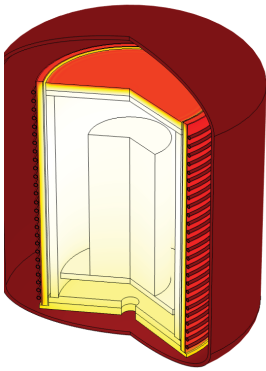


图 7. 左图为通过仿真生成的配备有水冷感应线圈的熔炉的温度分布图。右图中的结果展示了为线圈散热的石墨绝缘层的最优厚度。图像由 GrafTech 公司提供。图注: Current, Amperes - 电流, (单位: 安培); Coils too hot - 线圈过热; Coils sufficiently cool - 线圈充分冷却; Insulation Thickness, m - 绝缘厚度, (单位: 米)

要确保仿真 App 成为有效的工具, 验证底层数学模型是极为重要的一步。Beyerle 特别关注的一个问题是, 对石墨散热片传热性能各向异性的仿真, 必须在平面和弯曲面的情况下同时准确。如果仿真不够准确, 结果可能导致具有独特性能的石墨看起来与普通金属毫无差异。在 COMSOL® 软件中, 用户可以很方便地创建自定义的坐标系, 从而对弯曲和分支部分的材料各向异性进行建模。

运行此仿真 App 的速度非常快 (用时少于 12 秒), 这使得仿真 App 这一工具可以十分方便的在整个销售过程中使用。通过 COMSOL Server™ 产品的安装和使用, Beyerle 不仅能在 GrafTech 公司的本地电脑上运行仿真 App, 还能让同事和客户通过 Windows® 环境下的 COMSOL 客户端或网页浏览器远程运行该仿真 App。

» 优化熔炉设计和工序

尽管石墨在应用中有诸多优点, 但 GrafTech 公司制造的许多独特等级的石墨材料都具有各向异性与与温

“通过数学建模生成的虚拟样机, 可以有效提升潜在客户对 GrafTech 公司的信任, 同时也能证明本公司提供的解决方案完全经得起考验。”

— NATHANAEL MAY, GRAFTECH INTERNATIONAL 公司资深研究员

度高度相关的材料属性。对这样的材料进行准确的建模是极具挑战的。Beyerle、Paul 和他们的同事 Nathanael May (创新技术部门的另一名资深研究员) 都明确地指出了这一问题。

“由于我们的材料拥有许多独特的属性, 这意味着我们必须要通过实验来构建一个可以在模型中使用的材料属性数据库。” May 解释道, “所有这些努力是完全值得的。通过数学建模生成的虚拟样机, 可以有效提升潜在客户对 GrafTech 公司的信任, 同时我们也能够很容易向客户证明 GrafTech 提供的解决方案的有效性。”

May 的主要研究方向之一就是使

用 COMSOL Multiphysics 搭建精确的多物理场模型。他说: “我多数时候需要构建用于模拟高温熔炉的二维和三维模型, 这些高温熔炉包括感应炉、真空炉和高质量晶体生长炉。”

图 7 向我们展示了 May 正在研究的感应炉示例, 以及使用仿真计算出的优化设计结果。他使用仿真来优化 GRAFSHIELD™ 石墨绝缘层的厚度, 以防止水冷感应线圈中的温度超过 100 °C。此外, 尽可能地减少绝缘层的厚度, 可以降低维持炉温所需的电流。

» 碳和石墨的广阔世界

谈到深入了解 GrafTech 公司极具特色的碳和石墨解决方案, 建模和仿真在其中起着不可或缺的作用。Beyerle, Paul 和 May 将实验测量和仿真模拟有效地结合在一起, 从而开发出了针对实际应用的 GrafTech 解决方案。

通过对产品建模, 并开发这些融合了仿真人员专业知识的仿真 App (这是 COMSOL Multiphysics® 软件特有的功能), GrafTech 公司拥有了为热管理应用提供易用的仿真设计的能力。仿真 App 不仅打开了碳和石墨以及数值分析的广阔应用领域, 同时还使企业内的员工和潜在客户能够从中受益。📍



Richard Beyerle 是 GrafTech International 公司创新技术部门的一名资深研究员。