

# 太阳能热发电中的仿真应用

北京有色金属研究总院使用多物理场仿真技术优化太阳能热发电中的真空集热管设计,不仅提高了集热管的太阳光吸收率,同时延长了其使用寿命。仿真技术的应用缩短了产品的研发周期并降低了成本,从而加快了新产品投入市场的速度。

作者 郑永生

太阳能热的使用是一种新兴的可再生能源利用技术,这项技术由于其转换效率高、价格低廉而被广泛应用,也是迄今为止太阳能使用中最为成熟的技术之一。尤其是太阳能热发电技术,具有兼容性强、对电网冲击小、性价比高、发电成本低、可存储和可调度等优点,在近年来发展迅速。

## ⇒ 聚焦型太阳能热发电

太阳能热发电也叫聚焦型太阳能热发电。与传统发电站不一样,它们通过聚集太阳辐射的方式来获得热能,并将热能转化成高温蒸汽驱动蒸汽轮机来发电。当前的太阳能热发电按照太阳能采集方式可划分为太阳能槽式发电、太阳能塔式热发电、太阳能碟式热发电等。

槽式发电是最早实现商业化的太阳能热发电系统。抛物面槽式热发电系统(见图1)利用抛物柱面槽式反射镜将阳光聚焦到管状的接收器上,并将管内的传热工质加热产生蒸汽,推动常规汽轮机发电。该类系统采用线聚焦方式,利用抛物面型反射镜将光线汇聚到管状集热器——真空集热管上,加热集热管内循环流动的导热工质(通常为水、油或熔盐)。导热工质自吸收管一端流

入,接收汇聚太阳光辐射能量,从吸收管另一端流出,在流入到流出的过程中,导热工质被加热。系统内集成的光线追踪器可以探测太阳的方向,从而使反射镜和集热管在光线追踪系统的控制下,实时转动跟踪太阳东升西落,以实现最大的太阳光接收率。

太阳能热发电技术虽然拥有良好的商业化发展前景,然而目前太阳能热发电设备的结构设计和研发完全依赖于物理实验,不仅成本高、实验周期长,同时不利于快速占据市场先机和提升附加效益。为在降低试验成本的同时加快产品的研发速度,北京有色金属研究总院(以下简称“有研总院”)的太阳能光热技术团队对聚光集热系统进行了仿真优化。

有研总院的太阳能光热技术团队专注于热发电高温真空集热系统的研究,不仅利用多物理场仿真方法辅助进行系统结构设计、选材校核、可靠性评估、使用性能预测,还关注新产品研发所涉及的关键基础问题的原始创新,使产品的改进、更新更具可持续性。随着技术集约要求的日益提高和真空集热系统的不断增大,系统的传热优化设计越来越困难,这已成为制约热发电技术突破的关键因素。

## ⇒ 模拟太阳能聚光过程

由于太阳能热发电系统槽面汇聚的太阳光主要集中于集热管的下半面,上半面接收的会聚太阳光较少,因此集热管上的光辐照强度沿管轴向呈非对称性分布。如何有效地将反射镜接收的太阳光能传递到导热介质中,就成了提升太阳能热发电系统效率的重要因素。有研

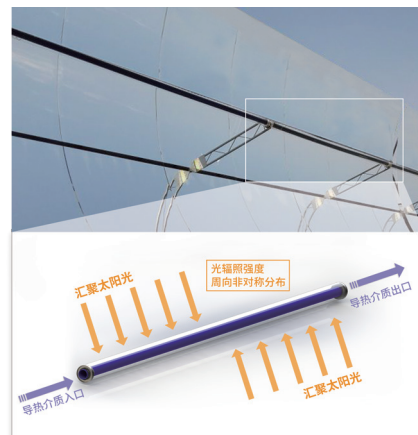


图1. 上图:槽式太阳能聚光集热系统,包括抛物面型反光镜、接收装置真空集热管和光线追踪机构;下图:聚光集热系统关键元器件——真空集热管,抛物面型反光镜将太阳光汇聚至真空集热管,导热介质从真空集热管的一端流入,吸收太阳辐射产生的热能,然后从另一端流出,从而将热能传递到导热介质。

总院的太阳能光热技术团队致力于太阳能热发电技术中高温集热器件与系统的建设,工程师们希望基于实际工况,对槽式光热系统进行光线聚焦分析,通过优化聚光器槽面的几何结构设计,实现太阳光能利用的最大化。

有研总院的工程师赵旭山博士借助 COMSOL Multiphysics® 软件,研究槽面几何参数对能流聚光比和光能密度周向不均匀分布的影响规律。同时,考虑太阳光入射角、非平行光到达地球的张角、反射镜表面粗糙度造成的漫反射、临边昏暗等,设定不同的几何结构(镜面开口宽度、高度、开口半角)、材料属性、太阳辐照强度以及其他边界条件,进行了模拟计算。模拟所得的槽式聚光器的聚光能量和能流密度结果如图 2 所示,通过对聚光器结构的优化,可以将太阳光能量集中于集热管,从而提高集热管的能量吸收率。

通过 COMSOL 软件的“射线追踪”模块进行射线追踪仿真,可以很直观地得到集热管接收到的光能密度,其与太阳辐照强度的比值即为此槽式系统的聚光比。根据所需的聚光比,可以方便地进行聚光器槽面几何结构的设计,以实

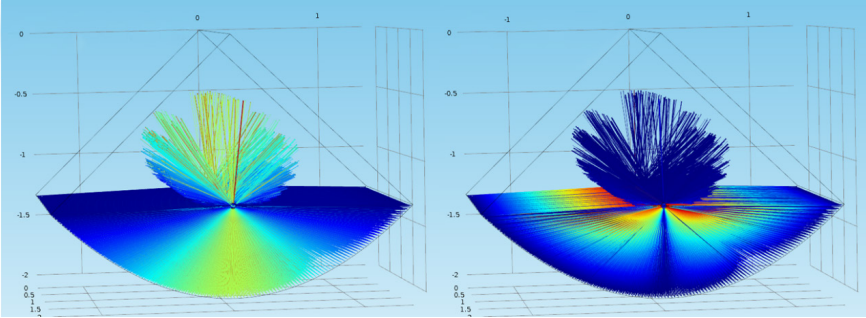


图 2. 左图: 槽式聚光器既定光程后各局部接收到的太阳光能量分布,太阳光通过槽面的反射汇聚至集热管上;右图: 聚光器光能密度分布,在集热管及其两侧位置能流密度较大。

现聚光效率的最大化。此外,还可以获得集热管周向光能密度的非对称分布和轴向聚焦光斑的不均匀分布,这些结果可为集热管的结构优化提供基础数据。

COMSOL Multiphysics 软件内置了功能强大、简便易用、丰富灵活的参数交互接口,用户可以很方便地进行入射线方向、非平行太阳入射角、镜表面粗糙度、射线密度等设定,从而充分评估不同物理效应间的相干性。“从各方面来看,它都不愧是一款功能全面、简单易用的有限元分析工具。”有研总院高级工程师赵旭山博士说道。

⇒ 优化真空集热管结构

面槽式太阳能热发电系统的集热管两端支持固定于聚光器上。当集热管接收会聚太阳光辐照能量后,内部温度最高可达 550 °C,由于集热管本身自重和热应力,会产生一定的形变。同时,在这个过程中,集热管外表面与外部环境通过热辐射和对流两种方式进行热交换。为了对集热管在服役时的高温状况下的温度和应力进行准确的预测,设计出最佳的真空集热管结构,赵旭山博士借助 COMSOL Multiphysics 的“传热模块”和“CFD 模块”模拟了集热管工作过程中的传热、传质。在模拟过程中,赵旭山博士同时考虑到了射线追踪模拟所得的集热管周向能流密度不均匀分布,计算出集

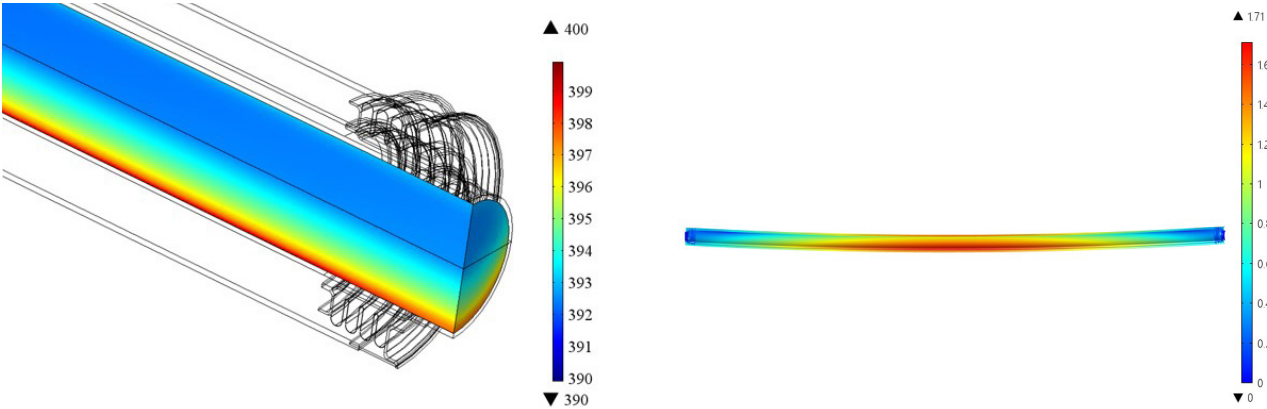


图 3. 真空集热管实际工况条件下的动态特性分析。左图:集热管内部导热流体的温度分布,由于会聚光线集中在下半面,呈现温度分层;右图:集热管应力应变分布情况,应力主要集中在集热管的中段底部。



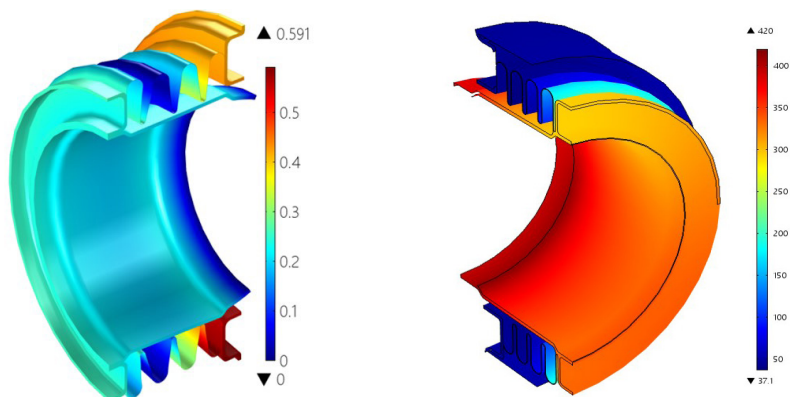


图 4. 真空集热管热膨胀补偿组件——波纹管的变形和温度分布仿真结果。左图为波纹管的应力应变计算结果，波纹管不同位置的应变情况不同，顶端应变最大；右图为波纹管的温度分布结果，波纹管的内壁温度较高，更容易产生热疲劳。

热管内的温度分布、导热工质的流速，以及集热管的应力分布。

有研总院的技术团队利用仿真计算发现集热管的底部温度较高，这与他们的测量结果一致；而集热管的中间段底部位置由于自重和热应力作用而成为应力应变最大的区域，如图 3 所示。“基于仿真计算结果，通过优化集热管的材料特性，我们确定了性能最佳的真空集热管结构，减少集热管在实际使用时在高温情况下产生的变形。”赵旭山博士解释道。

太阳能热发电系统的集热过程复杂，涉及的物理场较多，因此基于试错式的传统结构设计方法在真空集热管结构优化和新产品开发中并不适用。传统设计方法不仅研发成本过高、市场响应速度过慢，而且一些关键的性能参数无法通过实验手段获得。“COMSOL Multiphysics 软件提供的多物理场仿真平台，可以很好地解决这个问题。”赵旭山博士说道，“利用 COMSOL 软件，任意局部的多物理特性影响下的温度、速度分布及相应的应力应变分布都得以细致快速地呈现，为新型结构集热管的开发提供了强大准确的评估依据。”

### ⇒ 延长集热管的使用寿命

真空集热管内层为不锈钢吸热管，外层为高透过率玻璃罩管，中间形成环形密闭高真空保温区域。但是由于玻璃和不锈钢的热膨胀系数不匹配，从低温到高温、再到低温的热循环运行工况必然会造成玻璃罩管的破坏，降低集热管的使用寿命。于是必须在玻璃管和不锈钢管之间增加补偿机构——波纹管，以抵消玻璃罩管和不锈钢内管由于热膨胀系数的差异造成的变形异步。

有研总院的工程师首先对波距、波高和波纹数不同的波纹管在指定应变下的工作状态进行了分析，对不同参数的波纹管的补偿量进行了初步评估，确定了波纹管的波距、波高和波数的合理范围，能够有效抵消玻璃罩管和不锈钢内管间由于热膨胀系数的不同，在温度变化时造成的变形差异。工程师们同时考虑到了在波纹管温度变化的工况下会由于材料的热膨胀引起应力的集中和应变的累积，从而导致波纹管的热疲劳破坏。因此，他们对初步评估的合理范围内不同结构参数的波纹管发生破坏的循环次数进行了预测，进一步优化波纹管的结构，最终设计出循环次数高达 4800

万次的波纹管结构，从而有效地提高了整个集热管的使用寿命。

通过真空集热管集热过程中的多物理场分析，可以得到波纹管实际工况条件下每一局部的热变形情况（图 4 左图）和温度分布情况（图 4 右图），即使厚度仅为 0.1 mm 的波节部分对各个物理过程的反馈，也能得到很好的预测。此外，为对波纹管进行全面的可靠性评估，借助 COMSOL Multiphysics 的参数扫描功能，通过设定一系列补偿量，可以考察不同补偿量条件下的应力-变形情况，为波纹管的选材、结构设计、寿命预测等提供依据。

“借助多物理场仿真，我们深入理解了聚光集热系统及其关键元器件真空集热管在实际运行工况下的各个物理过程，提升了我们的新产品设计能力，减少了许多不必要的加工和测试，有效降低了设计和加工成本。”赵旭山博士说道。

目前，有研总院已建成年产 2 万根的 4 米高温真空集热管的中试线，中试产品已在 3 个光热电站中实现示范应用。在进行高温真空集热管开发的同时，研发团队也时刻关注槽式太阳能聚光集热系统的发展，并进行了大量的调研，于 2014 年形成了槽式聚光集热示范系统开发方案，2016 年初在北京怀柔建成了太阳能光热发电系统示范工程。❖



北京有色金属研究总院太阳能光热系统设计高级工程师赵旭山博士在中高温太阳能集热管生产车间。