

仿真帮助改善 载人航天器的空气再生系统

载人航天器中的生命保障系统必须为航天员提供呼吸空气和饮用水。通过空气再生回收和环境监测系统, NASA 的工程师们正在开发确保飞船船员安全的空气控制装置。

作者: LEXI CARVER

图片由 NASA 提供

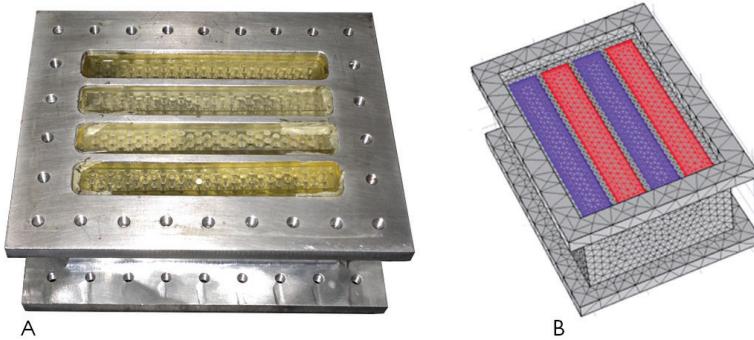


图 1:(A) 四道 IBD 照片。(B) IBD 的网格化 COMSOL 模型。紫色区域表示湿层, 红色表示干层。

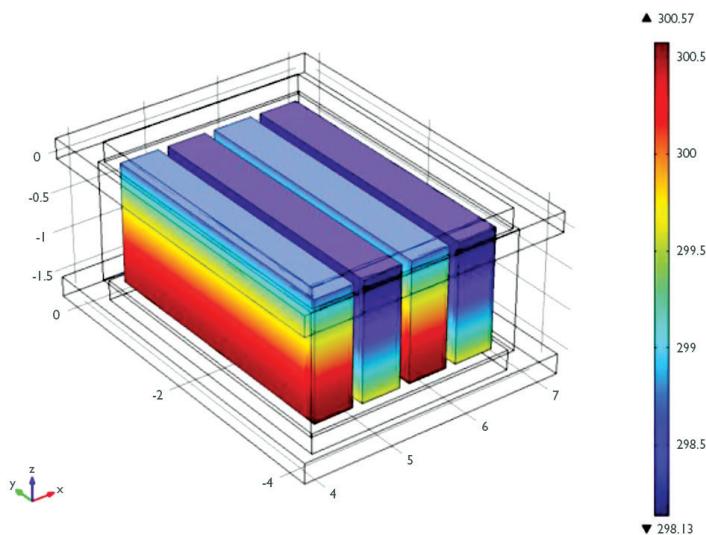


图 2: 仿真结果显示了每个填充层中的温度 (K)。第一和第三道包含向下流动的湿空气, 第二和第四道包含向上流动的干空气。

为确保航天员的安全和太空任务的成功, 需要定期对载人航天器中的空气进行再生处理。对于要持续数月的太空任务, 这意味着需要不断对空气进行除湿, 采集水分供重新使用, 并排出二氧化碳 (CO_2)。其中, 船载空气控制系统的一个组件是集水装置, 作为空气再生回收和环境监测 (ARREM) 项目的一部分, NASA 的航空航天工程师 Jim Knox 正在对它进行优化。他带领着马歇尔航天飞行中心 (阿拉巴马州, 亨茨维尔镇) 的一支团队, 旨在通过降低该装置的功耗, 并最大限度地提高集水能力来提高该装置的成本收益和效率; 他们的目标是能够回收空气中 80% 至 90% 的水分。他们希望为 NASA 的飞行系统开发人员提供一种综合的方法来实现空气再生和水分采集, 最终提高太空任务能够完成的飞行时间和距离。

通过高效吸附分离水分和 CO_2

对航天器内的空气再生处理需要分离水分、去除 CO_2 , 并在水分凝结成液态之前将它返回到空气中。该团队开发的集水系统 (见图 1A) 称为等温体干燥器 (IBD)。它包含一个具有封闭通道 (称为填充床) 的底座, 其中每个通道都布

满了硅胶颗粒，用于促进水分吸附（吸取水分的“干”床）或解吸（将水分返回到空气中的“湿”床）。每对填充床都配备了一个用于传热的泡沫铝晶格。

集水过程以同步半循环的形式进行，即一些空气进入干燥床，同时一些空气离开湿润床。在干燥床中，空气中的水分以放热方式吸附到硅胶上，即通过对空气进行干燥来采集水分，然后空气进入 CO₂ 去除系统。不含 CO₂ 的空气流回到湿润床。与此同时，干燥床中吸附产生的热量通过泡沫铝晶格传到湿润床，使水分从硅胶中解吸出来并返回到空气中。这种传热方式同时可以降低干层中的温度，使吸附可以持续更长时间。水分被泵回太空舱中，而 CO₂ 则被排入太空。从 IBD 流出后，太空舱空气将进入一个换热器和离心分离器，它们一起用于凝聚并分离出液态水，采集供再次使用。

仿真气体流动和优化填充层条件

通过使用 COMSOL Multiphysics[®]，Knox 的团队建立了四道 IBD 的模型，用于计算该装置的效率（模型如图 1B 所示）。IBD 几何形状



NASA MSFC 的空气再生计算机仿真团队。从左到右：Rob Coker、Carlos Gomez、Greg Schunk 和 Jim Knox。

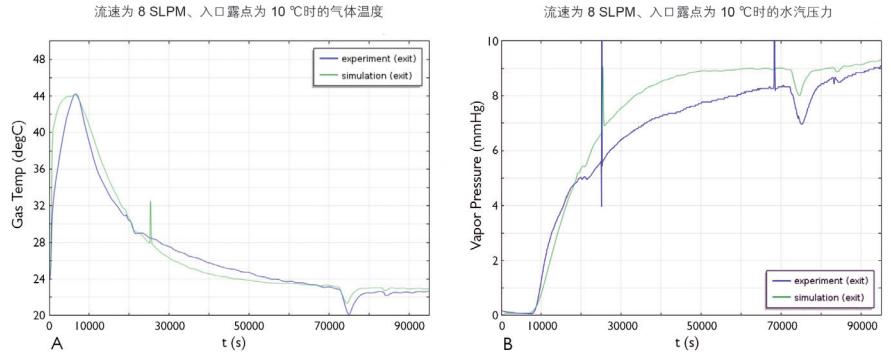


图 3：出口处空气的仿真结果，显示了 (A) 气体温度，(B) 水汽压力。

在 Pro/ENGINEER[®] 中创建，并使用 LiveLink[™] for Pro/ENGINEER[®] 导入。“COMSOL 允许我们对复杂几何进行这种多物理场仿真，”Knox 说：“我们需要仿真层中的多孔介质流、多种材料中的传热、输入压力边界，并确定吸附率。”他们发现由于放热吸附，干层在气流向下流动时获得热量。与之相反，湿层在气体向上流动时丧失热量（见图 2 和图 3）。

团队成员 Rob Coker 使用穿透测试（空气在泵的作用下通过干层）计算了 IBD 的效率。起初，离开干层的空气是完全干燥的；所有水汽都被吸附到硅胶上。随着更多的空气流过，出口处空气中的水汽浓度上升；最终，由于硅胶颗粒无法再

容纳更多的水分，它与进入的空气具有相同的湿度。通过观察这个过程，该团队获得了 IBD 模型的参数值，然后他们将穿透测试结果与实验结果进行比较（见图 3）。COMSOL 的强大功能让他们可以追踪水浓度、流动速率和压力，流入、流出的边界条件，以及每个半周期的干、湿空气变化。

从仿真结果来看，IBD 去除了空气中 85% 的水分，并将它返回到空气中以供采集。该模型成功地预测了 IBD 的效率；从这里开始，他们将能够进一步优化热链填充层的设计。

为 NASA 提供可靠的空气调节方法

该团队的 COMSOL 仿真为集水装置提供了宝贵的优化和设计指导。他们通过最大限度降低功耗要求，最大限度地提高排出 CO₂ 之前的集水能力，提高了 IBD 效率。这是再生系统的众多重要部件之一，他们希望可以扩展太空任务的可达范围。此外，他们还使用 COMSOL 仿真来设计适合更长任务的新系统，可以从 CO₂ 中分离出氧气，减少太空船上必须携带的 O₂ 量。借助这些创新设计和仿真的强大功能，我们很快就会拥有比从前飞得更远的载人航天器。■