

# 拥抱增材制造给先进核反应堆带来的前景

文/Lucy Ashton

**想**象一下3D打印核反应堆堆芯或核燃料芯块的情景。3D打印技术能够制造出足以承受核反应堆极端环境的坚固材料，这听起来似乎有些牵强，但许多专家认为，为了加快先进反应堆的部署和最大限度地利用核能应对气候变化，3D打印是非常必要的。

3D打印已经在一些行业中使用，它是一种增材制造技术，涉及一个通过逐层构建材料来打印物体的过程。这与减材制造相反，后者是切掉或烧掉多余的材料。3D打印直接使用数字图纸工作，由计算机控制，可以生成以前难以生成或不可能生成的复杂形状。这种制造方法速度更快，产生的废物更少，减少了出错的可能性，并且通常还能让设计师减轻物体的重量——所有这些特性都能显著降低制造成本。

“未来，核工业可能会广泛使用3D打印和其他先进制造技术，就像航空业和汽车业已经在做的那样。”原子能机构从事先进制造工作的核工程师Aninda Dutta Ray说，“潜力是肯定存在的。现正在顺利推进起始步骤，对照现有的核设计规范和标准进行深入的研究和审查，而一些监管机构甚至已经开始为其许可证持有者起草导则。”

## 引入和测试3D打印

与大多数新的制造工艺一样，起始步骤微小、缓慢而谨慎。核工业

已经出现了一些首次使用的案例，例如，2017年在斯洛文尼亚的一座反应堆上安装了一个3D打印的泵叶轮。这个类似风扇或涡轮的部件驱动水通过水泵。由于没有该部件的原始图纸，因此采用了3D打印技术。

在美国，橡树岭国家实验室正在为核领域和其他行业开发3D打印技术。在一次史无前例的测试中，橡树岭国家实验室打印出了称为通道紧固件的支架。这些部件于2021年被安装在一座核动力堆中，将一直使用到2027年，之后将被取出和进行检查，以评价它们在反应堆条件下的性能。2022年，法国跨国公司法马通公司在瑞典福斯马克核电站安装了首个3D打印的不锈钢燃料部件。此外，俄罗斯联邦最近建造了一台能够打印直径达2.2米、高1米的物体的3D打印机，而在韩国，3D打印正在被用于制造控制阀部件等物项。

由于3D打印在发明之初并没有考虑到核工业，因此现正在根据核工业的需求调整制造技术。虽然工业标准组织正在创立其他行业的3D打印标准，但关于核工业的标准仍在开发之中。

Dutta Ray认为，找出最佳测试方法、在全球范围内将它们标准化并获得监管机构的批准，可以说比制造技术本身的实际创新和完善更具挑战性。在欧洲，汇集了欧洲六个国家的13个组织的NUCOBAM（“基于增材制造的核部件”）项目正在开展研究，

---

“未来，核工业可能会广泛使用3D打印和其他先进制造技术，就像航空业和汽车业已经在做的那样。”

—国际原子能机构核工程师  
Aninda Dutta Ray

---



这些燃料组件支架由橡树岭国家实验室与法马通公司和田纳西流域管理局合作制造，是将安装到核电厂的首批3D打印安全相关部件。

（图/美国能源部橡树岭国家实验室F.List）

以制定准许3D打印用于核电厂的认证和评价过程。

美国电力研究所也在与美国能源部和制造商合作开展研究，以简化3D打印等新技术的监管验收。该研究的重点是调查先进制造技术的适用性，制定规范和标准，并利用独立的抗环境退化材料性能测试结果支持监管审查。“随着能源行业继续向先进能源系统（如先进反应堆）过渡，对替代供应链和加速部署的需求正在显著增加，”美国电力研究所先进制造项目首席团队负责人Marc Albert说，“增材制造和其他先进制造方法是加快清洁技术部署的推动因素。”

## 原子能机构的作用

原子能机构的作用之一是促进国际合作和知识共享。2023年4月，原子能机构发起了“创新支持在运核电厂国

际网络”。该网络是一个包容性网络，是各国就一系列创新主题包括3D打印等先进制造技术开展合作的平台。

2022年6月，原子能机构还发起了“核协调和标准化倡议”，其重点是促进安全可靠的先进核反应堆和小型模块堆的部署。该倡议旨在统一监管方案，并制定更加标准化的工业方案，包括关于适用于小型模块堆增材制造的核规范和标准的共同方案。

“合作创新是让下一代核技术尽快安全地走出实验室和进入世界以便我们能够帮助实现零净目标的关键，”原子能机构核电厂运行和工程支持团队负责人Ed Bradley说。“共享研究结果、技术和知识可节省时间和资源，因为每个核国家不必都去完成同样的试验或投入资金解决同样的难点。我们将以此取得成功。”