

## 过程控制

## CLAMIR 精确控制先进的激光制造工艺

与可见光波段的CMOS相机相比，高速中红外相机和软件系统，可以更精确地实现熔池监测。

文/Arturo Baldasano Ramirez

工业 4.0 正在推动工业界采用新技术，在生产线上引入自动化以及专业和复杂的工具。与此同时，诸如“未来工厂”和“零缺陷”等其他概念，也在推动新的制造方法得以实施，包括全面监控的更快、更清洁、更高效和更可靠的流程，并在可能的情况下实现实时控制。作为这种工业转型和这些概念实施的一个例子，激光技术被用作传统工具的替代品，使得各种先进的制造工艺日益部署到更广泛的工业应用领域。

其中一项激光技术是直接能量沉积 (DED) 技术。在 DED 技术的不同应用中，有两种正在工业领域中普遍采用：激光金属沉积 (LMD) 和激光熔覆，这两种技术都主要用于增材制造、熔覆和修复应用。通常，这些工艺都需要非常长的制造时间，在此期间，初始条件在工艺运行时动态改变。这增加了将传感器和驱动器集成到生产设备中的需求，使生产设备能够监测和控制工艺的关键参数，并使它们能够动态适应制造过程中发生的各种变化。

## 监测熔池

最容易发生变化的工艺特征之一是熔池，或者是通过入射光子与物

质之间的相互作用，将光功率突然转化为热量的区域。因此，非常有必要监测和控制影响熔池的参数，这些参数包括几何形状、热量分布、动力学和温度等。

西班牙 New Infrared Technologies 公司开发并商用了一种“使用红外光控制激光增材制造 (CLAMIR)”的解决方案。该解决方案能够持续监测熔池，并对激光功率进行闭环反馈

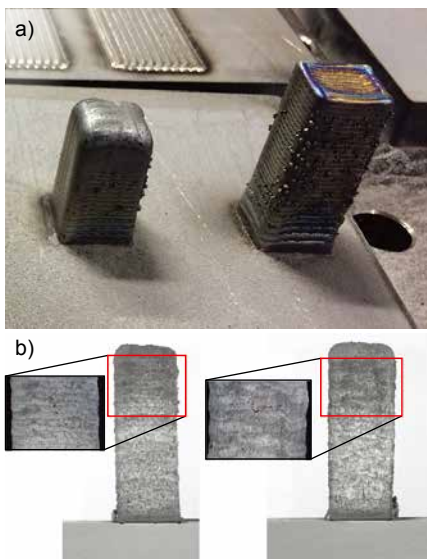


图2：在没有CLAMIR控制的情况下制造的LMD长方体 (a)，出现了不希望的工艺停止；利用CLAMIR控制制造的LMD长方体，顶部有清晰的边缘，并且没有裂缝 (b)。

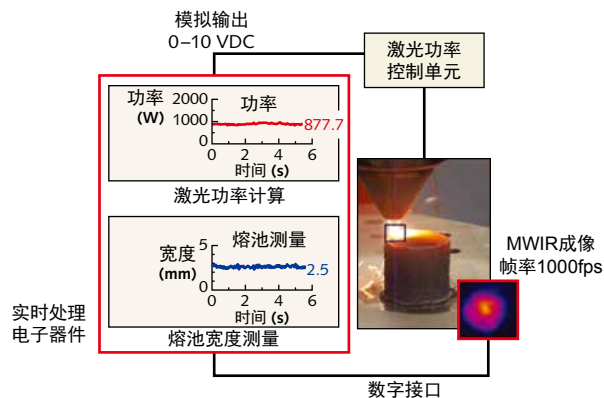


图1：使用红外光控制激光增材制造 (CLAMIR) 是一种工艺控制系统，它通过中波红外光 (MWIR) 而非近红外光和可见光实施监测。软件操作反馈，用于控制激光功率。

控制，以在整个工艺过程中保持其性能恒定。CLAMIR 使用高速非制冷红外 (IR) 相机作为主传感器，与激光光学元件共轴耦合，使相机能够以 1kHz 的帧率获得熔池的红外图像。基于相机内部执行的图像的实时处理，该系统能够连续提取熔池的关键参数，例如温度梯度、几何形状、面积和宽度。CLAMIR 采用先进的算法进行分析和控制，实时控制入射激光的功率，目的是使沉积过程保持在用户定义的公差范围内 (见图 1)。在现有光学系统中安装 CLAMIR 的能力，使其可以改装到现有设备中。

CLAMIR 是一款结构紧凑、坚固耐用的设备，符合工业领域的坚固性要求。该嵌入式系统由三个主要的子系统组成：1) 传感器：在 1~5 $\mu\text{m}$  范围内敏感的高速红外相机，能在室温下非制冷工作 (这一点非常重要，因为不需要定期维护相机)；2) 用于实

时图像处理的电子器件；3) 用于工艺控制的电子器件。

## MWIR的优势

与处于其他波段的视觉技术相比，如传统的高速可见（VIS）相机，使用中波红外（MWIR）相机可获得更卓越的性能。由西班牙 Spanish Center of Excellence 和德国 Fraunhofer ILT 研究中心进行的一项研究得出结论：高速 MWIR 相机能提供比传统高速 VIS-CMOS 相机更有价值的信息，用于监测激光焊接和 LMD 工艺。

MWIR 相机的主要优势在于，其在达到饱和之前，能够以高得多的对比度观察到更宽的温度梯度。<sup>[1]</sup> 这项工作中的性能分析表明，用户能从 MWIR 相机中提取出最重要的特征。在表现最佳的功能列表中，第一个代表性的 VIS 功能位于第 34 位，这让我们了解到了使用 MWIR 光谱波段监控激光焊接工艺的优势。

CLAMIR 包括软件工具，其可为选定的生产机器和工艺配置系统、记录工艺数据（包括 IR 图像），以及记录数据的可视化。

CLAMIR 已经设计用于使用多种工艺速度和材料，实时控制 LMD 和熔覆工艺，并可与市场上大多数已有

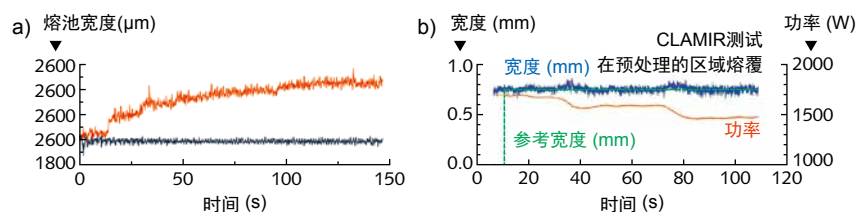


图3: 在LMD工艺中, 熔池宽度在没有CLAMIR控制 (a) (橙色) 和有CLAMIR控制 (b) (深蓝色) 的情况下的演变。在熔覆工艺中, CLAMIR可以防止衬底材料的损坏, 并允许进入预处理区时的平滑过渡。在钢管上熔覆Inconel 718的过程中, CLAMIR控制激光功率 (橙色线)。绿线显示参考宽度, 蓝线显示工艺过程中测量的实际宽度。

的激光光学元件一起使用。CLAMIR 在激光光学元件中的机械集成, 是通过将相机 (通过 C 接口) 耦合到现有光学端口来完成的, 该光学端口需要能够传输波长超过  $1.1\mu\text{m}$  的工艺反射光, 因为这是 IR 相机用于监测熔池的波长范围。大多数现有的激光光学元件具有二向色镜, 以将这种辐射带入光学端口用于观察目的, 从而使得这种集成非常简单。

CLAMIR 允许连续控制激光功率, 避免由于功率过大而使制造部件过热, 降低缺陷部件的百分比, 减少材料的数量和能量浪费, 从而提高生产率。图 2 显示了在没有 (a) 和有 (b) CLAMIR 控制的情况下, 制造的两个 LMD 长方体之间的差异。在左侧长方体的顶部可以看到熔化效应, 由于不能继续正常地生长部件, 导致机器不可预测的停止。另一方面, 右侧的长

方体在顶部显示出清晰且明确的边缘。此外, 金相分析显示, 用 CLAMIR 控制制造的长方体中没有裂缝。

目前, CLAMIR 是一种多功能工具, 用于实时控制和监测工业中广泛应用的大多数现有的 LMD 和熔覆工艺 (见图 3)。然而, 经常出现需要使用新材料的新应用, 并且出现了更复杂和更精细的新沉积工艺。不同的材料和结构, 都需要改进的工艺条件。CLAMIR 概念被设想为一种适应性强的系统, 能够适应新的制造方法, 以可行的方式增加新的控制功能。□

## 参考文献

1. J. Rodríguez-Araújo, A. García-Díaz, V. Panadeiro, and C. Knaak, *Imaging and Applied Optics* 2017, ATH2A.2; <https://doi.org/10.1364/aio.2017.ath2a.2>.