

激光加工中的低相干干涉测量： 一种工业应用中作为新标准的传感器方法

Markus Kogel Hollacher 博士
Precitec 公司研发部门负责人



如今，激光是工业制造中常见的工具，从减材制造到增材制造，从激光切割到激光焊接，实现了广泛的工业应用。当前，生产的主题围绕“数字化”和“工业 4.0”等关键词。在这种情况下，激光起到了主导作用，因为它可以采用非接触式工艺直接从数字模型生产部件。这一独特功能为使用智能设备监控工艺过程提供了契机，这也是工业 4.0 的关键问题。

传感器技术是智能工厂、预测性维护以及过程控制的主导技术。将机器元件转换为智能网络物理系统需要智能传感器的集成和过程监控。开发传感器系统，尤其是针对这一工业领域的传感器系统，是普雷茨特 (Precitec) 的主要业务之一。

OCT (Optical Coherence Tomography, 光学相干层析成像) 技术是一种基于低相干干涉测量 (LCI) 的成像技术。长久以来，它在医学检测领域应用广泛，如采用具有低相干长度光源的干涉仪用于测量距离以及人体组织的构成，如角膜等。通过使用发射广谱光的光源来实现低相干长度。这种情况下，所应用的光源通常是超辐射发光二极管 (SLD)，其范围为约 10 纳米。

与通常用于激光材料加工并通过利用由于光束-材料相互作用而产生的辐射来确定工艺状态的传感器技术不同，OCT 使用自己的光源并将该光耦合到加工激光的光束路径中。对于激光器制造而言，这项技术开辟了新的视野：降低现有产品的制造成本、提高现有产品的质量、实现新产品设计、降低流程成本、缩短开发周期、改善质量保证体系、在早期生产阶段检测和纠正缺陷，以及实时控制流程。

此外，在将激光用于焊接汽车零部件，以实现安全标准的工业应用中，OCT 技术更是一个明证。例如，2018 年 1 月，普雷茨特 (Precitec)、宝马 (BMW)、Blackbird Robotics，以及慕尼黑工业大学机床与工业管理研究院 (IWB) 等企业和院校机构携手合作，试图寻求和开发一种用于车身构造的替代型焊接技术。OCT 等非接触式工艺与光电传感器结合起来，能够在制造过程中为检测定向和状态、评估工艺结果，以及共享和记录这些信息所提供的巨大潜力所在。通过集成在振镜上的同轴激光扫描测量，OCT 技术可用于焊前的焊缝跟踪，焊中的激光匙孔深度测量，焊后的表面轮廓测量，从而在车身构造的远程激光焊接应用中打造出柔性工艺链。

据 Market Research Future (MRF) 研究机构发布的调研显示，全球光学相干层析成像市场到 2023 年的总值将达到 14.84 亿美元左右，2017-2023 年期间的复合年均复合增长率为 8.9%。

OCT 在激光材料加工中的发展回顾

过去 10 年内，OCT 在激光材料加工应用中经历了一些重要的里程碑：

- 2008 年：RoFaLas 项目展示了时域光学相干层析成像系统 (TD-OCT) 在远程焊接中的应用；
- 2009 年：在美国光学学会激光和光电会议上，演讲人 Paul Webster 以“采用频域光学相干层析成像系统 (SD - OCT system) 实现激光加工的脉冲间和脉冲内动态和反馈控制”为题作了分享；
- 2014 年：欧洲激光技术创新奖的二等奖颁给“使用低相干干涉测量法进行激光材料加工中的穿透深度和形貌测量”；
- 2017 年：光纤激光器制造商 IPG Photonics 收购了加拿大企业 Laser Depth Dynamics (简称 LDD)，LDD 是一家专门为激光焊接应用提供加工过程中的品质监测和控制解决方案的企业；
- 2018 年：汽车一级供应商通过采用 OCT 传感器的测量技术来控制激光功率，从而在批量生产期间精确控制焊缝的穿透深度。这是该技术在世界范围内的首个工业应用。

采用连续波激光光源的 OCT 技术已在激光材料加工中树立了行业标准；将传感器与固定光学元件进行匹配仅仅是元件选择的问题。然而，罗马非一日能建成，最大的挑战是提高用户对于准确性方面的持续敏感性；只有在自动化程度不断提高的情况下，OCT 技术才能获得广泛使用；毋庸置疑，将 OCT 技术应用在额外任务（譬如焊缝跟踪等）中将提高其接受程度，但同时也会显著提升其技术要求（OCT 扫描振镜、采样率、实时处理，以及成本）。

OCT：一种受控工艺

OCT 是一种受控工艺，其测量位置可以旁轴设置，同轴设置，相对加工激光束略微偏移或完全独立地使用偏转扫单元。测量频率极高，即使采用高速激光工艺也可使用该技术。OCT 技术也称为低相干干涉测量法，它通过分析信号调制进行距离测量（两个分波的干扰），微加工应用中，其加工头通常为 F-theta 扫描透镜。此外，OCT 描述了方法的基本布局，包括参考和测量路径，可以精确地测量两个路径之间的差异，并且当参考路径固定时，从系统导出的值恰好与路径差异匹配，例如激光粉末床熔融 (LPBF) 工艺或表面烧蚀过程中的匙孔深度或表面形貌。

在焊接工艺的穿透深度控制方面，OCT 也独具优势。以低碳钢为例，在加工速度 3 m/min 以及控制频率 1 kHz 的情况下，图 2 显示了焊接工件的横截面情况。

如果你可以测量，你就可以控制。Precitec 的 IDM 控制系统中配置的 OCT 传感器的测量功能用于控制激光功率，从而在批量生产期间控制焊缝的穿透深度。在该工业应用中，激光用于焊接汽车行业相关的安全部件。Precitec 开发了 IDM PowerTec 模块，以完成工艺流程以及满足客户要求。

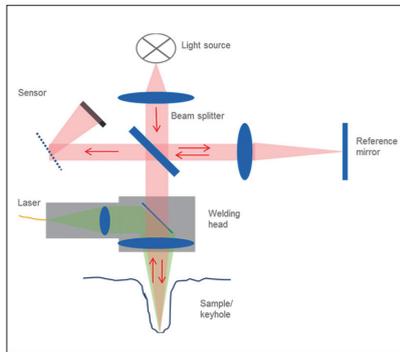


图 1 低相干干涉测量原理图

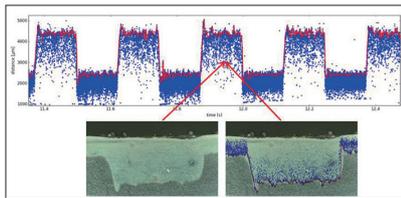


图 2 闭环控制的穿透深度的横截面（左）；匙孔深度叠加（右）

联合研发项目 - 科学与工业界携手并进

从产、学、研、用角度来说，学术界和企业界携手并进，持续深化 OCT 技术在工业领域的应用。2016 年 10 月，Precitec、西门子、Ibarmia、亚琛工业大学、Michelin 等数家企业参与了一个为期三年，名为 PARADISE 的计划，该计划通过将基于激光的增材和减材工艺与高效率相结合，为大规模制造金属部件提供高效、经济且可靠的解决方案。PARADISE 计划将以具有成本效益的方式开发针对复合工艺量身定制的专业 CaX 技术、智能组件和监控系统。为此，该项目旨在促进和扩展激光金属沉积（LMD）技术在增值型金属部件生命周期中的应用。

然而，在粉末层的厚度控制方面存在一些挑战：由于缺乏几何过程数据，在定向能量沉积（DED）工艺，即“激光粉末成型”过程中，无法实现恒定的层厚。这将偏离设计原则并引发工艺不稳定。客户需要自动控制的构建过程以及稳定的打印质量：“首次即准”。因而，解决方案是将 Precitec 提供的距离传感器与西门子数控系统 SINUMERIK 840DSL 的控制循环功能结合起来，以实现粉末层厚度的进给速率控制。

鉴于此，西门子和 Precitec 公司通过将 OCT 技术集成到



图 3 焊接层厚控制对比（左：不受控制的失焦工艺；右：受控的对焦工艺）【图源：www.paradise.eu】

SINUMERIK 控制系统中，实现了全闭环控制的 LMD (Laser Melting Deposition) 工艺，同样也适用于其他激光制造工艺，即使吹到工件表面的金属粉末也不会改变精确的表面拓扑测量，因此测量值可用作控制回路的输入。

事实上，OCT 技术实现的真正创新如下：无论是在深熔焊还是在激光表面改性过程中，干涉测量的精确度不受来自气孔毛细管或其相邻区域的电磁辐射的影响，只有从低相干光源发出的“自身”光才会导致参考和测量路径之间的干扰。因此，通过测量点的精确定位，匙孔的深度可以与加工激光束同轴测量，并且不管焊接几何形状和材料如何，都可以独立于表面状况精确地确定结构化表面的形貌。

对于完全监控甚至控制的需求，LMD 和 LPBF 等增材制造工艺与其他激光应用没有区别。Precitec 公司在各种应用中证明，OCT 是用于获取最主要信息的非常有前景的传感器技术，处理结果的拓扑结构以及同轴适应性完全可以同步获得。LPBF 成形过程中可能出现的缺陷，如气孔、变形、涂层缺陷、层偏移，甚至所谓的球化效应，都会导致形貌变化，因此使用 OCT 技术进行检测和测量图像。

Precitec 的 IDM 传感器基于低相干干涉测量法，能够测量焊接过程中匙孔深度的变化。因此，针对零件样品的加工结果可知：IDM 传感器在 DED 过程中能够提供可靠的距离值；进料速率对粉末层厚度有重要影响，且易于控制；控制算法必须适应各种粉末层构建策略。下一步还需要持续发展控制算法；另外西门子、Precitec 和亚琛工业大学等战略方之间需深化合作关系，从而在市场上建立全闭环运动控制机制。

在激光微加工中，将低相干干涉测量法作为传感器技术是另外一种值得关注的的应用可能性。由于大多数应用都结合使用了带振镜技术的短脉冲和超短脉冲激光以偏转激光束，因此传感器必须适应这些特殊的加工头。

结合使用短脉冲和超短脉冲激光加工能够实现三维塑料

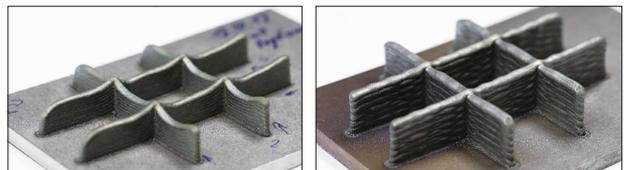


图 4 左：标准 DED 工艺具有缺陷，右：受控的 DED 工艺优势尽显【图源：www.paradise.eu】

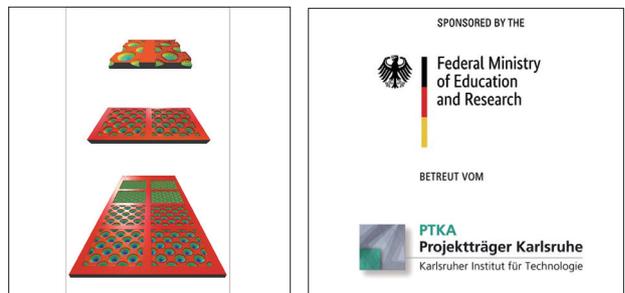


图 5 短脉冲和超短脉冲激光加工能够实现三维塑料模具钢的大规模表面结构化处理【图源：Project eVerest funded by BMBF (02P14A145).】

模具钢的大规模表面结构化处理。在汽车工业中，正针对越来越多的表面进行微观结构处理。无论是将它们添加到气缸还是仪表盘，功能型表面都风靡一时。由于能够提供几乎无限的精度，激光是适合这项工作的理想工具。为确保生产率与精度相匹配，基于使用了两种不同脉冲类型的激光器，正致力于实现在一台机器上有效加工大型表面的目标。

在研发层面，可利用与结构化激光器相同的光路。另外，可切换型参考光路的概念包括扫描工作区时，光路长度会发生变化（传感器的测量范围不足）；通过将安装空间划分为单独的区域，可以为每个区域选择适当的参考光路。

OCT 在微加工应用中面临的主要挑战是解决标准扫描振镜和传感器的兼容性问题。此外，如何为不同应用选择正确的

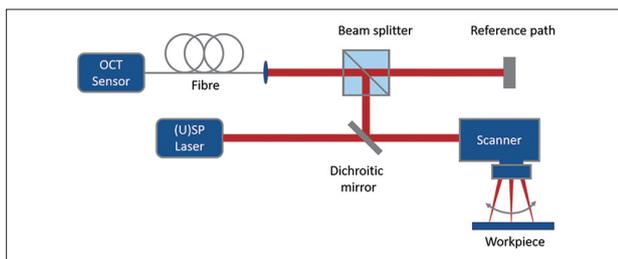


图6 OCT传感器与超快激光光源结合使用的工艺流程图

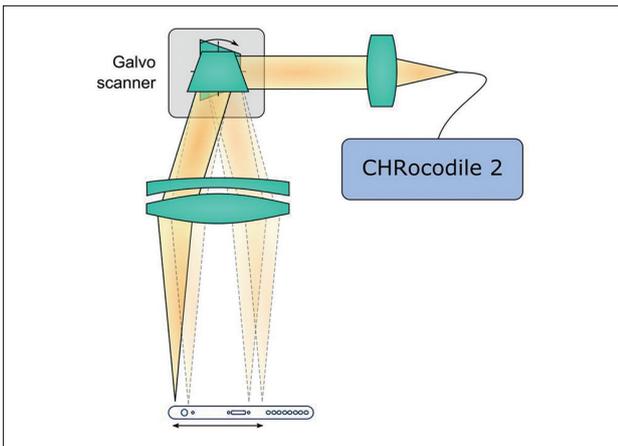


图7 飞点扫描仪 (FSS) 是一种具有“飞点”的 OCT 技术，它可以对多种材料进行测量

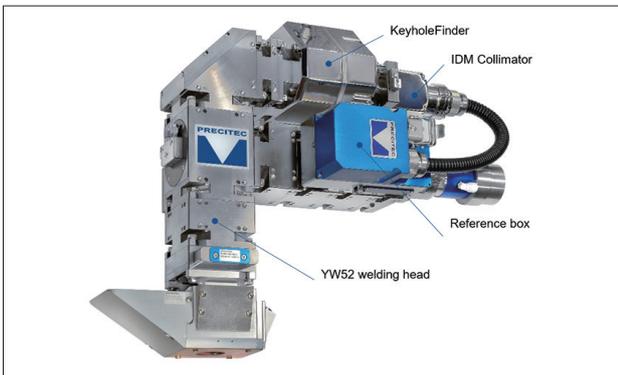


图8 搭载 YW52 焊接头的 KeyholeFinder 熔深测量系统能够实现零漂移匙孔测量

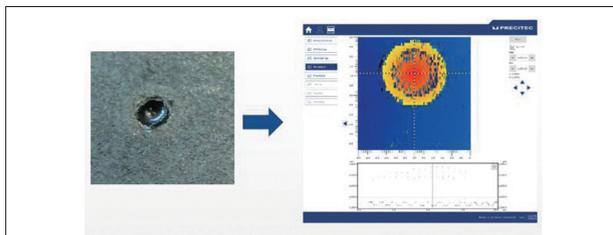


图9 KeyholeFinder 的预调整包括扫描零件导孔的几何形状以及确定准确位置 / TCP

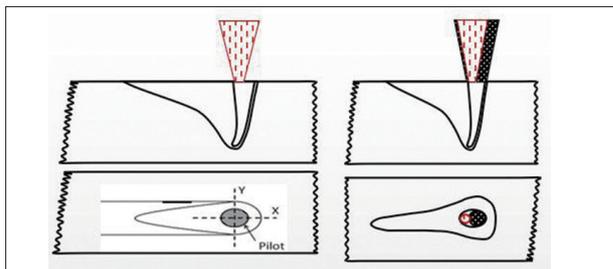


图10 KeyholeFinder 的精细调整包括焊接过程中根据导孔位置进行交叉扫描、实现匙孔检测的重复精度，以及首次焊接时执行

波长也是关键点。

飞点扫描仪 (FSS) 是一种具有“飞点”的 OCT 技术，它的干扰模式可以进行距离评估，能对许多材料进行测量，包括晶圆、涂层、薄膜等。FSS 快速和多功能的形貌测量用于平均梯度或失真测量，并且可通过软件包定义测量点和模式。

如果不能将 OCT 传感器调整到加工激光的光束路径中，那么 FSS 是实现高速和高分辨率形貌测量的优选方案。

另外，Precitec 推出的 KeyholeFinder 是适合工业焊接的熔深测量系统，能够实现漂移匙孔测量，它可以固定焦距光学系统相结合，优化工业用焊接熔深的测量和控制。由于使用精确的线性驱动器和特殊的光学设计，Keyhole 的位置可以被持续锁定。得益于特殊的结构设计，解决了传统 Keyhole 位置扫描中的长期漂移、温度漂移等问题。机械公差、漂移、温度效应和其他偏差因素不会显著影响定位精度。

结语

综上所述，可以得出一些关键结论。首先，用于连续波激光加工的 OCT（或低相干干涉测量法）技术在工业应用中已成为一种新标准的传感器方法。其次，将 OCT 与振镜系统相结合，打开了“丰富多彩的可能性”。能够针对具体的应用专门设计 OCT 系统，但需要澄清几个问题：使用的系统技术是什么？需要哪种光斑直径？需要哪种测量速度？是否必须更改测量点位置？是否需要过程控制（实时功能）？此外，精确测量需要精确且热稳定的光束引导和偏转模块。

5 年前，Precitec 开发的第一个工业版 OCT 传感器用于激光材料加工，这种传感器一直受到科研和工业用户的青睐。在许多大学和研究机构中，从连续波激光到短脉冲和超短脉冲加工，这种传感器被用作激光加工设备配置或评估加工效果的标准。

最后，OCT 绝非仅仅是一种“深度测量计”或“远程扫描跟踪器”——它还有更多的潜力和可能性亟待被发现。●