CAST HOUSE® TECHNOLOGIES

TPS®

www.t-p-s.cc



从研发到兆瓦级原型系统

电感耦合等离子体：电加热工艺的关键技术



WERNER WIGGEN

TPS
董事总经理
info@tps-gmbh.cc

能源密集型工业过程的脱碳是未来数年必须应对的重大挑战之一。铝行业当前面临的挑战之一，是在不影响产品质量、经济效益与设备可用性的前提下，以气候友好型燃料取代天然气等化石能源。采用等离子体作为电热源是一项具有前景的解决方案。自成立以来，TPS始终致力于该项新兴技术的研发，该技术具备完全取代传统天然气烧嘴的潜力。这一替代目标将通过开发专用于高温工业过程的电感耦合等离子烧嘴来实现。

等离子体：未来热源技术

等离子体常被称为物质的第四态。气体在吸收足够能量后，电子即从原子束缚中被释放，由此产生一种由离子、电子和中性粒子组成的导电介质。自然界中存在的等离子体实例包括闪电及太阳。

对于工业热工过程而言，等离子体具备显著的技术优势。由于等离子体直接由对等的电力产生，其热量产生过程不会产生任何碳排放（假定使用的是可再生来源的电力）。同时，该技术还可通过选用合适的工艺气体，精确调控过程气氛。

此外，等离子烧嘴结构紧凑，可较为便捷地集成至现有炉子系统中，相较于其他类型的烧嘴，可显著降低改造工程的工作量。

理论上有多种等离子体技术可供选择并投入应用。例如，电弧等离子烧嘴已有高功率规格的产品可供选用。然而，这类烧嘴存在电极磨损严重的问题，因此需要较高的维护投入。微波等离子体是另一种可选方案，但其适用范围主要限于较低功率等级——约100 kW以下。上述局限性意味着，在兆瓦级工业应用领域，电感耦合等离子体技术在效率、运营成本及维护需求等方面具有较大的综合潜力。

多年系统性开发的成果

由TPS主导的研发工作，始于与德国弗赖贝格矿业与技术大学合作开展的可行性研究。初步测试证实，铝在原则上可使用等离子体进行熔炼。试验同时显示出了良好的冶金效果，例如金属的氧化程度较低，且氢吸收量较少。

在可行性研究进行的同时，TPS在德国卡尔斯鲁厄理工学院开始对用于工业炉的多种等离子烧嘴设计展开研究。分析表明，在高功率等级下，电感耦合等离子体在经济性方面较其他替代方案具有显著优势。

在随后的数年中，研发工作聚焦于等离子体参数、电力电子系统及烧嘴几何结构的优化。大量的模拟与试验工作持续提升系统效率，并使其能够适用于氮气、空气、氧气及二氧化碳等多种工艺气体。

2025年5月，开发工作迎来了一个重要的里程碑：一台铝熔炼炉首次仅以 TPS等离子烧嘴运行。试验过程中，采用等离子体成功熔化100公斤铝。试验结果表明，仅生成了极少量浮渣，且熔融金属的冶金性能良好，具有较高的应用价值。

迈向兆瓦级功率等级

随着等离子体技术在中试规模下获得成功验证，研发重点已转向面向工业应用的扩大与推广。目前，TPS已在奥地利兰舍芬投入运行一套额定功率为 1 兆瓦的烧嘴系统，用于研发目的，为技术从开发阶段向工业化部署的过渡奠定了基础。

该系统采用基于最新研发的模块化电力电子技术，每个模块的输出功率为1 MW，使电感耦合等离子烧嘴能够在与工业应用相适应的功率范围内稳定运行。

尤为值得关注的是其预期的能效表现。以往的解决方案往往受限于电力电子器件的高损耗，而 TPS的设计可实现约88%至89%的烧嘴效率。这一效率指标已将烧嘴和电力电子装置中的各类转换损失全部计入。因此，该技术已达到能够实现能源密集型高温过程经济性电气化的效率范围。该技术的另一优势在于等离子体可达到极高的温度，远高于10,000°C。此高温条件使热量能够在相对较低的工艺气体流量下有效传递。与传统烧嘴系统相比，这一特性有助于减少排气热损，同时提高热量在炉内的有效利用率。

下一个里程碑：工业级示范装置

下一阶段的开发目标是将一套750 kW的工业示范装置安装至铝熔炼炉，该工作计划于年内完成。这将使系统能够在与工业化生产极为相似的条件下进行测试。我们的目标是对该技术进行验证，并系统收集能耗、工艺稳定性、熔炼性能、排放水平及金属质量等方面的数据。

目前已取得的阶段性成果表明，电感耦合等离子体技术在推动工业热工过程脱碳方面具有较大的潜力。基于现有的1 MW原型机，TPS已到达项目开发的决定性节点，并具备了将该项技术向工业级应用推进的条件。