

激光辅助涂布干燥过程的研究进展

郭瑷伟¹, 彭 明², 邱盈瑞³, 金建成¹, 王仪明^{1*}

¹北京印刷学院机电工程学院, 北京

²中国印刷科学技术研究院, 北京

³北京印刷学院新媒体学院, 北京

收稿日期: 2026年1月9日; 录用日期: 2026年2月2日; 发布日期: 2026年2月10日

摘要

涂布干燥是涂层制备过程中的关键环节, 其干燥效率与膜层质量直接影响最终产品性能。传统对流干燥方式存在能量利用率低、干燥时间长以及厚度方向不均匀等问题, 难以满足高性能涂层制造对精确控制的要求。近年来, 激光辅助涂布干燥作为一种局部、高强度的干燥方式, 逐渐受到关注。该方法能够在较短时间内向涂层体系引入能量, 并实现空间与时间尺度上的精准调控。本文围绕激光辅助涂布干燥过程的研究进展进行系统综述。首先, 从不同研究视角出发, 总结了学者们对该过程的分析方法, 包括实验观测、数值模拟以及多物理场耦合建模等。其次, 重点归纳了激光参数、涂层体系特性、基材条件及外部环境等因素对干燥行为的影响规律, 并对已有研究结论进行了分类梳理。在此基础上, 分析了当前研究在机理描述、模型适用性及工程放大方面存在的不足。最后, 结合涂布工业的发展需求, 讨论了激光辅助涂布干燥未来可能的研究方向。本文旨在为该技术的深入研究与工程应用提供系统参考。

关键词

激光辅助干燥, 涂布过程, 涂层干燥, 影响因素, 研究进展

Research Progress in Laser-Assisted Coating Drying Process

Aiwei Guo¹, Ming Peng², Yingrui Qiu³, Jiancheng Jin¹, Yiming Wang^{1*}

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

²China Academy of Printing Science and Technology, Beijing

³School of New Media, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: January 9, 2026; accepted: February 2, 2026; published: February 10, 2026

*通讯作者。

Abstract

Coating drying is a key step in coating manufacturing. Drying efficiency and coating quality strongly affect the final product performance. Conventional convective drying methods usually show low energy efficiency, long drying time, and non-uniform drying through the coating thickness. These limitations make precise process control difficult. In recent years, laser-assisted coating drying has attracted increasing attention. This method introduces energy into the coating layer within a short time. It also enables accurate control in both space and time. This paper reviews recent research progress on laser-assisted coating drying. First, different research perspectives and analysis approaches are summarized, including experimental characterization, numerical simulation, and multiphysics modeling. Then, the effects of laser parameters, coating properties, substrate conditions, and surrounding environment on drying behavior are systematically classified and discussed. Based on these studies, the main limitations of current research are analyzed, especially in process description, model generality, and scale-up application. Finally, possible future research directions are proposed according to the needs of coating industries. This review provides a structured reference for further studies and practical implementation of laser-assisted coating drying.

Keywords

Laser-Assisted Drying, Coating Process, Coating Drying, Influencing Factors, Research Progress

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

涂布工艺是许多高附加值制造加工流程中的关键环节，广泛存在于印刷电子、功能薄膜、光学涂层和电池电极等领域。涂布产品的最终性能在很大程度上由随后的干燥(或固化，后文中统称干燥)阶段决定：涂布液在基材表面由液态向固态转变的过程中，溶剂的蒸发、颗粒或聚合物组分的迁移以及由此产生的微结构演化与内应力累积，共同作用于膜层的致密度、附着力和孔隙分布等关键性能指标，显著影响膜层整体性能。而干燥环节不仅是涂布过程中工艺时间最长与能耗最大的环节之一，也直接影响产品质量与制程稳定性，是涂布工艺优化与产业化的核心问题之一[1]-[3]。

如图1所示，不同干燥技术在能量输入位置、能量传播路径及溶剂迁移行为方面存在一定差异。传统的工业干燥方式主要还是以热对流(热风)、辐射(红外)和微波等为主。热对流干燥技术成熟、适用性广，但这种干燥方式存在热惯性大、总体加热效率低以及在厚度或导热性不均的湿膜存在显著的温度梯度的缺点，并且表面先干、内部后干的“表层硬壳化”、孔隙滞留和应力集中等问题时有发生；红外或微波虽能在一定条件下提高局部能量输入效率，但在均匀性、可控性和对薄膜微结构调控方面仍存在局限[2][4]。随着对节能减排与高产能制造的要求日益提高，传统干燥方式在能效(单位蒸发能耗)和生产节拍上的短板愈发突出，促使研究者寻求更加高效、可控的干燥手段[5][6]。相比之下，激光辅助干燥在空间与时间尺度上的能量可控性更强，在干燥效率与工艺灵活性方面展现出潜在优势。近五年的文献统计结果进一步表明，高效与强化型涂布干燥技术正成为研究热点。

在此背景下，依托其高能量密度、快速热响应及可实现精确空间调控的特性，激光辅助干燥技术逐渐被应用于涂布过程的快速烘干与膜层固结研究，并展现出潜在的工程应用价值。对比于传统的均匀加

热，激光辅助干燥通过选择光源的波长、光斑的大小、功率密度实现对加热深度、加热位置的空间调控，从而有望在不显著增加系统整体能耗的前提下实现局部快速脱溶，对于热敏材料、薄膜功能层、需局部处理的柔性基底具有重要意义[4][7]。近些年，随着激光功率半导体器件、激光阵列、精密扫描系统、实时控制算法等的发展，激光辅助干燥工艺的工程可行性及产业化潜力显著提升，已在电池电极、印刷功能油墨、光学薄膜等方向展现出一定的规模化应用基础[6][8]。

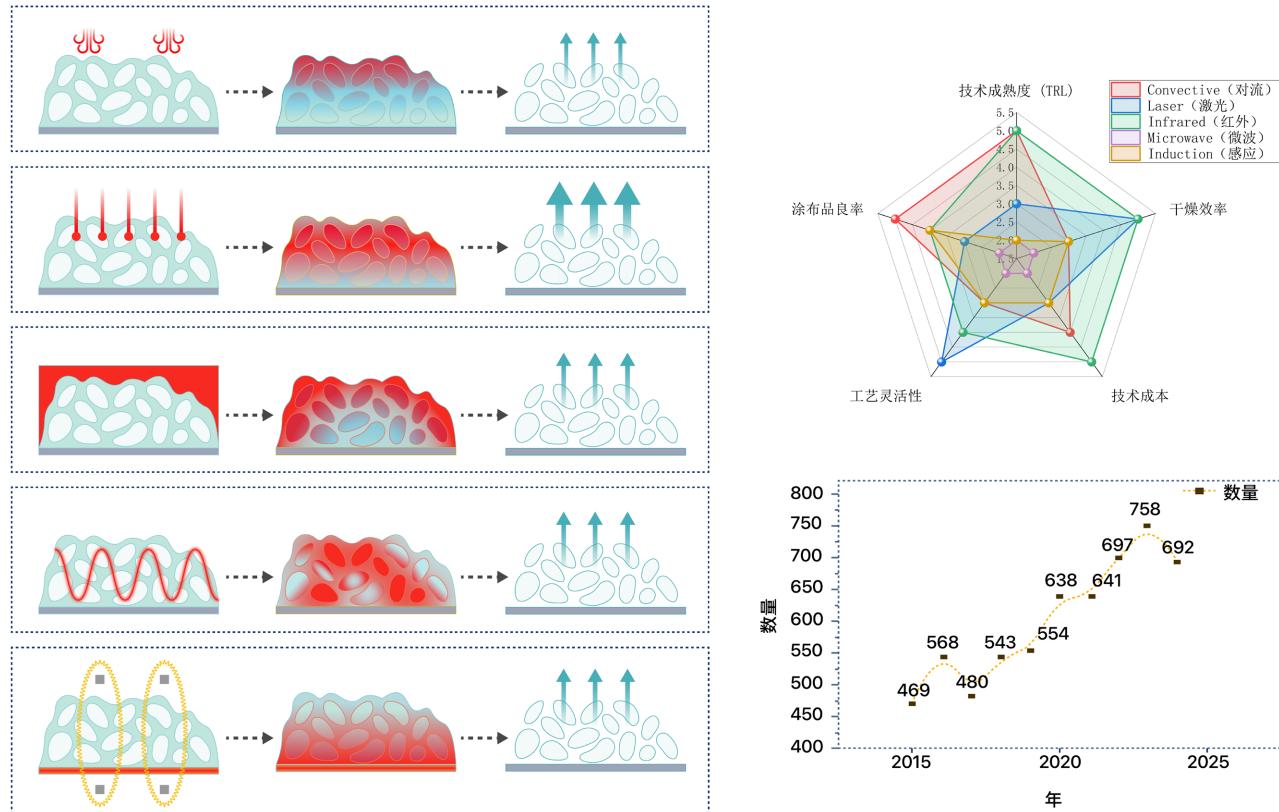


Figure 1. Comparison of coating drying technologies in terms of energy delivery mechanisms, technology readiness level, and recent publication trends

图 1. 不同涂布干燥技术的作用机理对比、技术成熟度评估及近五年研究发展趋势[5][9]

激光用于涂布干燥的研究并非单纯的“将热源替换为激光”；其内在的复杂性体现在多个层面。一方面，激光与材料相互作用中的光学吸收、光散射与反射随温度与相组成变化而动态演化，这会反馈到能量沉积分布上；另一方面，激光诱导的温度梯度非常陡峭，导致瞬时的毛细流、马兰戈尼效应与局部蒸汽过压等耦合流体力学过程，从而影响颗粒/聚合物的迁移路径与成膜过程，最终决定微观结构与宏观性能[1][3][10]。目前学界和产业界的研究，有的侧重于以热传导方程和瞬态有限元模拟描述温度场与蒸发通量，有的以原位或准原位实验方法观察粘结剂/颗粒迁移和孔隙演化，还有的以工艺示范为主探索激光参数在放大生产中的可操作窗口。这些研究各有所长，但尚未形成一个能同时描述光学参数动态、热-质-流耦合与结构演化的统一性框架[1][6][11]-[19]。

基于上述现状，本文旨在对激光辅助涂布干燥过程的研究进展进行系统梳理，重点梳理了以下科学与技术问题：

- (1) 当前学界如何从不同分析视角认识激光干燥过程(能量输入与热传递、溶剂迁移与膜层成形、多场耦合与结构演化)？

(2) 哪些关键参数(包括激光参数、涂布体系性质、环境与辅助条件以及工艺路径)对干燥性能影响最大, 其规律性如何?

(3) 现有研究在哪些方面存在方法学或证据链的不足(例如原位表征、吸收率的动态测量、多尺度模型的耦合)? 并据此提出面向涂布工业化的研究优先级与方法路线。

为实现上述目标, 本文按照以下逻辑展开: 第二部分归纳不同研究者对激光辅助干燥的主要认知视角与分析方法; 第三部分按参数类别系统总结影响行为的经验规律与模型成果; 第四部分指出当前研究的主要不足并提出未来研究方向; 第五部分给出总结与对产业化的若干建议。本文的讨论以涂布行业的典型体系(包括水性聚合物分散体系、功能性浆料和电池电极浆料)为主, 同时结合跨领域的光热耦合与多物理场建模成果, 力求理清在当下理论研究与技术实操之间的耦合关系和过渡路径。

2. 激光辅助涂布干燥过程的研究视角与分析方法

本图 2 展示了激光辅助涂布干燥系统的局部能量输入过程, 并结合红外热像监测实现对温度场的实时表征与控制并同时揭示了激光作用下涂层内部的温度梯度、压力梯度及其对溶剂快速蒸发与迁移行为的影响。激光辅助干燥的研究不仅仅是简单地将部分传统对流或辐射热源换成了激光热源, 其还涉及到光能量吸收、热量传导、溶剂蒸发与迁移现象、流动场演化与相变动力学等多个不同的物理过程的耦合, 不同的学者从能量传播、质量传播、结构发展、多物理场数值模拟等方面进行了不同程度的探索, 逐渐形成了对激光辅助干燥的分析模型[1][3][11]。总体上来看, 主要包含有 4 类, 分别是能量输入与传导特征的研究、蒸发行与溶剂迁移规律的研究、温度与流动场的耦合建模研究, 以及不同分析视角的综合比较。

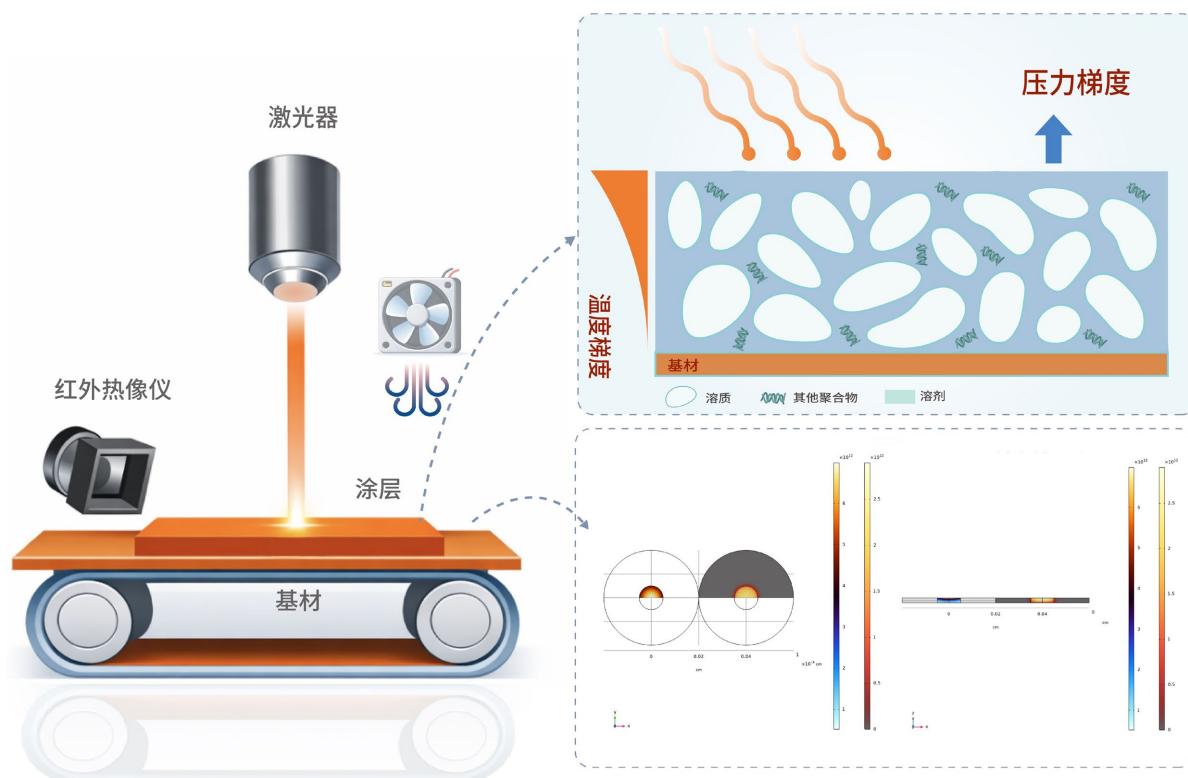


Figure 2. Schematic of laser-assisted coating drying and the associated evaporation enhancement mechanism
图 2. 激光辅助涂布干燥系统示意及能量吸收蒸发扩散方式示意[7]

2.1. 能量吸收与热传导特征的研究

激光照射薄膜表面后，其能量沉积首先遵循 Beer-Lambert 定律支配的光吸收过程，沉积能量形成表面热流密度，并通过瞬态导热在膜厚方向扩散[20]-[22]。因此，激光干燥过程本质上是一个强局域、快速响应的光-热耦合过程，其热量传递时标远小于对流换热主导的对流干燥体系。

由于在激光干燥过程中，干燥的初始温度分布取决于热源的能量空间分布和在液膜中的能量传递，通常认为光源的波长、涂层的吸收率以及基底表面的反射率决定了激光与液膜体系之间的能量耦合方式[4]。由于光照射后表层的瞬时温度升高能够在毫秒或甚至亚秒内形成强大的非平衡热场，导致大的温度梯度以及较高的界面蒸发通量，其传热机理明显区别于以对流换热和整体传热为主导的传统热风干燥过程[23]。激光诱导局部热扩散与对流加热、红外加热相比，能量沉积集中、热响应时间短，使表层温度升高比内部快，从而改变了溶剂在膜层内的质量传递路径及其蒸发发生的时序特征[5] [6]。

此外，在输入能量形式上，通常采用高斯型或指数衰减型近似激光分布光强函数[24]的基础上与傅里叶热传导方程结合描述温度场，并且针对金属材料或者高反射材料，还采用了一些考虑了反射率修正系数的多次散射再吸收修正模型[25]。近年一些研究采用红外热像或者高帧率光学温度测量手段对表面温度进行了原位测量，得到了激光光强、光斑直径和扫描速度与干燥速度和温度均匀度非线性的关系等结果，为深入理解激光辅助干燥过程中的能量耦合方式奠定了基础，为后续建立多物理场耦合模型提供关键边界条件[9]。

2.2. 蒸发行为与溶剂迁移的研究

涂布液膜干燥过程中界面收缩速度、溶剂通量与膜厚变化，遵循薄液膜干燥动力学控制和毛细粘性流动行为控制[26]-[28]，以上过程为分析激光辅助涂布干燥中界面稳定性和固体液体分离速率的重要理论依据。

在涂层由湿状态到干状态转变的过程中，溶剂的蒸发和颗粒的转移是涂层的关键步骤。激光加热与加热扩散相比，其温度梯度差导致了更快的蒸发进程。经过激光干燥的涂层，大多数经历了一个短暂的“快速蒸发表层形成期”和“降速蒸发期”，溶剂的扩散速率被内部因素所限制[11] [13]。Jaiser 等[29]用显微镜对电极上浆料进行冷冻切片显微观察发现，发现激光干燥可以有效地延缓粘结剂在厚电极中的流动，从而减少电极的内部不均匀性。这说明在激光照射瞬间，由于温度迅速升高、表面迅速固化，从而在干燥初期形成抑制溶剂对流的临时结构层并减少粘结剂不均匀分布带来的负面影响。

毛细回流与界面收缩的流变过程广泛分布在非均匀蒸发场的涂层中，常见的包括固体颗粒的边部堆积、界面处流驱动形成结构，这些现象在激光干燥中因蒸发通量较大，更加剧烈和可控[26]-[28]。部分作者将毛细压力、马兰戈尼流动(表面张力梯度驱动流动)引入研究思路来解释激光辐射下颗粒再分布的原因[10] [12]。可视化实验和数值模拟结果显示，较高的激光功率密度加速了溶剂量迁移，但如果激光输入过大则会引发过快固结、过快内部扩散、孔隙不均匀。通过调控激光扫描路径和激光功率脉冲形式来达到蒸发速率与内部扩散速度的平衡是获得高质量的干燥膜层的关键[10]。

2.3. 温度场与流动场的多物理场耦合建模

激光辅助干燥过程中温度场、浓度场、流动场等通过界面条件和内部输运过程形成显著的耦合关系，界面快速局部加热在界面处温度梯度容易诱发经典热-毛细驱动(Marangoni)流，且在薄膜中形成反补偿流，不利于颗粒重排和厚膜结构的形成等[15]。众多研究围绕上述问题提出了一系列不同形式的多物理场模型，Routh 等[1]采用多孔介质提出了一个能同时描述热传导、蒸发扩散、相变的连续介质模型。Font 等[19]考虑粘结剂的迁移项，建立溶剂浓度、粘度、蒸发速率反馈的非线性控制方程，最后通过物理实验验

证了此方程。相关模型表明，激光加热所形成的高局部热流密度会显著影响溶剂向外迁移的动力学过程，从而为后续干燥工艺参数优化给出必要理论依据。

近期研究进一步将流体力学方程和热辐射传输方程联合起来，建立更为复杂的多物理场耦合模型[16][17]。Kumberg 等[18]通过有限元仿真对不同涂层厚度，导热系数和扫描速度的温度和蒸发速率进行了定量模拟，结果表明薄膜体系的温度更灵敏，厚膜更易产生温度滞后和应力集中。红外热像图与质损监测被广泛用于物理验证来对此类多物理场耦合模拟结果进行校验[30]。多物理场模型的不断发展，促使激光干燥机理由定性的认知向定量的预测转变，为后续的智能工艺控制奠定了基础。

2.4. 不同研究视角的整合与比较

从已有研究成果可知，激光干燥从能量传递到溶剂转移再到多物理场耦合，已逐步建立了多尺度、多层次的体系。研究视角在关注重点上具有互补性，但仍存在明显差异，比如能量输入研究重点考虑激光参数和温度场控制，忽略溶剂转移和结构进化反馈等；再比如蒸发迁移研究，从材料角度出发，忽略能量空间定量等；多物理场模型虽然可进行耦合，但通常基于简化假设，如恒定吸收率或恒定相变速率等，仍难以全面反映实际过程[11][19][29]。上述差异说明了激光干燥本质上是一个高度复杂的耦合问题，有必要进一步加强模型构建与实验验证之间的融合。

可以预见，随着光源调控精度的增加、原位表征方法的发展及计算能力的提高，激光干燥的研究将逐渐从定性认知阶段进入定量表征与可预测阶段。综合不同研究视角的分析结果，构建反映“光-热-流-质”耦合特性的统一分析框架，将是推动激光干燥从实验探索向工程应用发展的一个重要途径。

3. 影响激光辅助涂布干燥行为的关键因素与规律

激光辅助涂布干燥是一个多因素耦合的过程，光源特性、涂层结构、环境条件、输入能量方式等影响因素相互作用关系复杂。众多学者对其影响因素进行了深入研究，从实验研究、理论建模、工程实践等多个层面逐步摸索出了激光干燥的调控规律，总结而言主要可以分为激光参数的调控效应、涂布体系与基底材料特性的作用、环境与辅助条件的影响、工艺路径与能量控制方式四个方面。

3.1. 激光参数的调控效应

激光功率密度、激光波长、激光扫描速率和光斑半径是影响激光辅助干燥行为的关键工艺参数。功率密度会直接影响涂层表层的升温速率及能量沉积水平。功率密度低，表面温度不足以驱动有效蒸发；功率密度高，表面会出现局部过热、涂层烧结和分层开孔。Neb 等[6]发现对于水性电极浆料干燥，当功率密度从 10 W/cm^2 增加到 50 W/cm^2 时，干燥时间可缩短约 70%，但表面粗糙度和孔隙率显著增加。Fink 等[7]指出，激光功率密度和扫描速率适中的工艺窗口下可以实现较快且均匀的溶剂去除过程。上述实验清晰地表明，功率控制窗口是决定激光辅助干燥工艺性能的核心因素之一。

波长的选取往往取决于涂层体系对不同波长激光的吸收特性。对于有机聚合物或含水体系来说，近红外区域($0.8\sim1.0 \mu\text{m}$)能在穿透深度与吸收效率之间具有较好的平衡，而对于含金属氧化物或炭黑粉料的电极浆料来说，在 $2\sim3 \mu\text{m}$ 的范围内，能获得更高的吸收率[4][31]。由此可见，实现波长与材料吸收特性的匹配是提高干燥能量利用率的基础。

扫描速度以及光斑大小决定单位面积的能量输入量，研究发现扫描速度太快会导致能量输入不足，形成表面不固化完全呈湿润的薄层，速度太慢又会产生局部热积累。适当的扫描步距和光斑重叠能够保证均匀沉积能量，最终形成平整的表面和致密的内部干燥膜[24]。部分研究中研究人员使用多个激光阵列或者振镜扫描来调整干燥速度及干燥梯度，实现可控梯度干燥，被认为是可应用于工业规模生产的有效

技术路径[25] [32]。

3.2. 涂布体系与基底材料特性的作用

涂层与基底的光学与热物理性质决定了激光干燥行为的内在机理。对于普通水聚合物分散体系，吸光率与膜厚成正比，当膜厚达到一定程度后，内部热量传递受限，会导致涂层的不均匀干燥[10]。Kumberg 等人[18]系统研究了电极厚度对干燥的影响，当其从 $80 \mu\text{m}$ 增加到 $160 \mu\text{m}$ 时，其干燥时间增加超过一倍，且涂层内部残余溶剂含量显著上升，Kumberg 等人的实验很清晰地说明了在厚膜条件下传热与溶剂蒸散过程失衡是涂膜干燥缺陷产生的根本原因之一。

基底的导热、反射率和表面粗糙度同样显著影响着温度场的分布和涂层的附着力，高导热率的金属基底一定程度上改善了表面温度过热，但导热率也减小了表层的升温，从而抑制了蒸发速率[5]；低导热的聚合物基底更容易实现高温梯度，但容易发生翘曲和热畸变等问题。不同的研究者通过在基底与涂层的界面加入中间层或抗反射膜改善了能量的吸收分布和膜附着力[1]。另外，材料成分中的填料吸收率、颗粒分布和比热也对干燥速率具有一定影响。比如炭黑含量增加会显著提高吸收率，但也会增加热量局部集中现象，需要进行功率限制[19]。

3.3. 环境与辅助条件的影响

干燥过程中的气体气氛和外部辅助条件一般被认为是激光干燥中比较次要的影响因素，但其影响同样不可忽视。干燥气氛的组成会影响到溶剂蒸汽的扩散速率以及冷凝-蒸发的平衡，高湿度会导致较低的蒸发驱动力从而降低干燥速率[33]。敞开体系中，对流能够带走表面的蒸汽，保持较高的蒸发通量，过强的对流会导致温度场波动并诱发表面缺陷[34]。

近年来，“激光-热风”或“激光-红外”式的复合型激光辅助干燥策略逐渐受到关注，对流换热与激光辐照协同作用下，可以有效避免热应力过度集中，具有更高的能效利用率和更稳定的表观形貌[35] [36]。Altvater 等[35]利用近红外激光干燥发现预热风可以提高 15% 的能量利用率并显著降低表面龟裂发生率。这种方式为宽幅涂层的高效干燥提供了一种能效增加和设备集成化的新思路。

3.4. 工艺路径与能量控制方式

激光能量的输入方式和工艺路线决定着干燥过程的均匀度和局部可控性。除了传统的连续扫描外，脉冲激光输入和分区扫描策略逐渐开始被研究。脉冲模式可以在不增加平均功率的情况下显著提升瞬时峰值功率，使干燥行为在周期的峰值蒸发阶段和内部扩散阶段之间交替进行，以有效缓解表层集中问题[25]。在石墨阳极激光干燥实验中，Wolf 等[8]认为，适当的脉冲化输入能量可以使输入的溶液在电极厚度方向分布更均匀，有利于后续压实。

能量控制方式的另外一个发展方向是实时反馈的自适应调节。通过红外热像仪和表面温度监测手段，实现激光功率的闭环控制，使干燥过程在温度演化与质量损失的双重约束下保持稳定[19]。随着流程路线的规划以及功率的不断变化，可以实现在不同区域实现按需加热与智能干燥功率控制，也是激光辅助干燥技术从实验室走向生产实际的关键一步。

3.5. 参数耦合与多因素协同规律

尽管单因素试验的研究结果揭示了工艺参数对干燥行为的基本影响规律，但真实情况是复杂因素综合作用的结果。激光功率、扫描速度与膜厚之间存在显著的相互制约关系。功率与扫描速度匹配得当可形成相对稳定的温度平台，实现溶剂的快速且均匀去除；反之会出现过度固化或能量利用率降低的现象[7] [18]。涂层对激光的吸收特性与基底材料的导热性能共同影响热量在厚度方向上的传递行为并对干燥

速率及膜层残余应力的演化展现出明显的影响作用。

试验设计方面，有研究提出响应面法(RSM)和正交方法，对干燥参数进行系统性研究[19][29]。普遍认为能量均匀分布和热-质传递动态平衡是保证高干燥质量，低能耗的两个关键控制参数。基于此，后续研究将着重由“单参数控制”优化为“多参数协同优化”，结合模型预测与实验反馈实现全过程的激光干燥调控。

本文为系统梳理影响激光辅助涂布干燥行为的关键因素与规律，现对已有代表性文献进行横向对比分析。现有研究主要集中于锂离子电池、电极涂层等工业涂布领域，这些研究在涂层材料、溶剂体系、激光参数以及干燥效果评价方式等方面存在明显差异。对这些工作的归纳与比较有助于明确激光辅助涂布干燥的共性规律及其适用范围。相关代表性研究在应用领域、工艺条件及主要研究结论等方面的对比情况汇总如表1所示。

Table 1. Comparison of representative studies on laser-assisted coating drying
表 1. 激光辅助涂布干燥相关代表性研究的对比汇总

文献	应用领域	涂层材料	溶剂类型	激光参数(波长/功率)	干燥时间或速率对比	主要研究结论
Von Horstig 等综述, 2022 [5]	电池/涂层	多体系	多种	未具体说明	文献对比分析	指出激光干燥机理研究仍不足
Neb 等, 2022 [6]	锂离子电池	多种电极体系	多种	多激光类型	文献综述显示显激光干燥在能效和速度方 著提速	面优于传统方法
Fink 等, 2023 [7]	锂离子电池	石墨基电极	水基	高能量密度激 光, 约 7.2 J/cm ²	蒸发速率显著高 于对流	激光可实现高效蒸发, 但 建议与对流干燥结合以避 免缺陷
Wolf 等, 2023 [8]	锂离子电池	Si-Graphit 电 极浆料	水基	高功率二极管 激光(未明确)	干燥时间减少 80%	>激光干燥在保证电极结构 与附着性能的同时显著提 高干燥效率
Kumberg 等, 2025 [18]	锂离子电池	电极浆料	水基	VCSEL 激光 阵列	完全干燥时间约 20 s	激光多阶段干燥显著提升 生产节拍
Laserline 工业报告 [32]	电池/印刷	多种涂层	多种	900~1070 nm, 445 nm	能耗降低 25%~50%	激光干燥适用于连续化工 业生产
Von Horstig 等, 2025 [37]	锂离子电池	负极涂层	水基	激光与 感应加热	干燥速率提高 50%~90%	过高干燥速率可能导致组 分迁移

注：表中激光参数基于文献公开信息整理，部分研究未给出具体波长或功率，仅进行定性归纳；干燥时间或速率对比以各文献报道结果为依据。

4. 现有研究的局限与未来研究展望

目前激光辅助涂布干燥的研究理论研究和实验研究都取得了显著进展，但是从实验研究到工程化应用仍然面临一系列系统性挑战。现有研究普遍面临模型描述准确性、实验可验证性以及尺度可扩展性、智能控制方面存在许多问题，在一定程度上限制了工业化的发展。因此，对目前存在的关键问题进行归纳，进一步明确今后的研究方向，对构建完整的激光辅助干燥体系，实现高效化智能化涂布控制大有裨益。

4.1. 过程描述与模型统一性研究的现存局限

现有激光干燥模型大多建立于传统热对流干燥理论框架，通常假设吸收率、蒸发率、温度场为常数或准稳态分布[1]，然而由于激光辐照引起的强非稳态场和不均匀边界使得这些假设难以成立，而大多数

模型仅将激光辐照简化为热传导或者蒸发扩散等单过程，无法同时刻画光学吸收、热扩散与溶剂迁移之间的复杂耦合关系，限制了模型对实际干燥行为的预测能力[3] [16]。

部分研究引入了热 - 质 - 流多物理场耦合模型，但仍普遍忽略吸收率改变，相变潜热释放及光学性质随温度的变化等关键物理过程[19]，比如将光 - 热耦合简化为恒定吸收系数，忽略了干燥过程中由于溶剂组分变化引起的光学折射率及散射率变化[24]。这种近似简化了模型计算，但影响模型准确度。此外，目前尚缺乏统一的模型验证框架，各自研究小组的边界条件及参数都不相同，结果之间可比较性不高，未来需要适合所有体系的模型，将光学传输、热传导、蒸发迁移和流动动力学效应都纳入一个体系中，实现对激光干燥全过程的可靠预测。

4.2. 表征与物理实验验证手段的现存局限

现有表征方法的局限性限制了激光干燥机理研究的深入开展。绝大多数的实验方法通过测量表面的温度演化或构建干燥速度曲线来推断激光干燥内部的机理，没有实时观测内部的迁移和结构的变化，因为激光照射温度梯度变化具有高度局域和高度瞬态的特点，红外测温或热电偶无法捕捉内部的瞬态变化[5]。争对这一问题，Jaiser 等[10]首次采用冻结断面和显微切片来探索电极内的粘结剂的迁移规律，但该方法本质上属于离线表征，还是无法捕捉干燥过程随时间演化的动态信息。

另一方面，微观形貌还只停留在干燥后的离线表征，还不足以认识成膜过程中毛细力、马兰戈尼和微应力的发展过程，未来需要发展高空间和时间分辨率的原位测量方法，例如同步辐射 X 射线层析成像、红外 - 质量损失双通道监测以及光学 - 声学耦合成像等方法来捕捉输入与响应的瞬态变化[6] [38]，数据驱动的表征策略和机器视觉方法可以辅助温度场、溶剂分布及应力状态的重构，为模型的验证与修正提供更多的实验依据。

4.3. 工艺可扩展性与能效优化的挑战

在工程应用方面，目前对激光辅助干燥的研究大多在实验室或单点照射。随着涂布范围和产线速度的增加，如何在大面积范围内实现均匀的干燥逐渐成了人们关注的重点问题[8]。由于光斑能量衰减、扫描拼接误差以及系统光学孔径与功率分布受限等因素，在尺度放大过程中会产生局部过热与未充分干燥区域，造成膜层结构波动。

此外，激光系统的能效还有进一步优化的空间。相较对流加热，尽管激光具备高瞬态能量密度与快速响应的优势，但其从电能输入到材料有效吸收之间需经历光电转换、光传输及材料吸收等多个环节，导致系统综合能效低于 50% [4]，也有文献报道了激光波长可调和多光束复合以提升系统能效的方法[31]。此外激光系统工艺节拍和系统能效的平衡问题也需要系统考量，过高的干燥速率虽可缩短周期时间，但同时可能放大局部非均匀性问题。因此亟需明确功率密度、干燥速率和能耗之间的最优平衡点，开发兼顾干燥质量、产线节拍与系统能效的平衡模型，为未来激光系统的应用奠定基础[39]。

4.4. 智能化控制与跨尺度建模的需求

随着智能制造的发展，激光干燥过程的控制方式正在由依赖经验参数设定的开环控制向数据驱动的闭环控制过渡。现有的研究中大多采用给定的功率和扫描速度，无法应对环境条件变化等过程扰动[7]。通过引入在线检测与反馈调节构成的实时闭环控制系统可以提高干燥过程稳定性和工艺可重复性。例如，通过红外热像的表面温度场监测实时调节激光输出功率，从而实现对干燥温度的自适应控制[30]。

在模型方面，应将实验数据与模型相结合，建立“模型 - 数据联合”的跨尺度预测方法。目前，对于激光干燥的研究还缺乏将吸收光谱、热 - 质流动和溶剂扩散耦合的模型统一定义的综合模型。未来研究

应进一步拓展薄液膜理论，构建多尺度耦合模型来描述界面处局域升温、质粒迁移和膜层固化的因果关系[26]-[28]。有限元模型能准确描述局域温度和质量场，但存在计算代价较高、适用范围受限等问题。近年发展起来的基于机器学习的物理受限神经网络(PINNs)能够对复杂的耦合过程进行预测，在激光辅助干燥过程优化中展现出潜在优势[40]。通过高通量实验和数据挖掘技术建立多变量响应数据库，能够实现激光功率、扫描速度、涂层厚度等等关键参数的自动化调节，促进工艺的自优化和自学习发展。

4.5. 未来研究方向展望

综合以上分析，未来激光辅助涂布干燥的研究可能从以下几个方向深化：

- (1) 多场耦合的统一建模：构建可同时描述光学吸收、热-质传递和流动行为的多尺度模型，实现从能量输入到结构演化的全过程预测；
- (2) 高时空分辨表征技术：发展适用于强非稳态环境的原位表征手段，实现对温度、溶剂浓度和应力分布的实时监测；
- (3) 能效与工艺集成优化：研究多波段光源、复合干燥模式与光学设计，提升整体能量利用率和工艺稳定性；
- (4) 智能化与自适应控制：利用数据驱动算法与机器视觉，实现激光功率、扫描路径和干燥速率的动态优化；
- (5) 标准化及产业化：建立统一的工艺评价标准与数据共享平台，推动激光干燥技术由实验研究向规模化应用转化。

激光辅助干燥技术已在能效、精度、绿色制造方面取得一定的发展，可以预见，随着光源、建模及智能控制等技术的进步，激光辅助涂布干燥将会取得进一步的改进，有望成为未来高端涂层制备体系中的关键干燥技术之一。

5. 结论

激光辅助干燥技术作为一种新兴的高能效过程强化技术，正在逐步改变传统涂布干燥的认知体系。本文系统梳理了国内外在该领域的主要研究进展，从能量传递、溶剂迁移、多场耦合到工艺参数调控等方面总结了学术界的主要研究结论与共识。综合所搜集到的文献和研究，可以发现激光辅助干燥具有高能量密度、快速响应及可控空间分布的特性，可以显著缩短干燥周期、改善膜层结构均匀性和降低整体能耗；而研究者和企业通过优选功率密度、波长、扫描速度与光斑尺寸，可实现“高效-稳定-低损”的干燥过程[6] [7] [8]。激光辅助干燥不仅是传统干燥方式的补充，其背后彰显着涂布行业向绿色化、智能化与精准化方向发展的重要趋势。

从激光干燥的研究历程来看，激光辅助干燥的研究已逐步从单因素实验研究转向多物理场耦合与多尺度建模阶段。当前模型能够定量描述温度场与蒸发行，在吸收率动态变化、相变潜热与微观结构演化等方面仍存在较大发展空间[18] [19]。试验研究从表面温度监测向原位多维表征演进，使得“光-热-质-流”耦合过程的观测精度显著提高。另外，复合干燥策略与多源协同能量输入正在成为新的研究热点，通过将激光与红外、热风或微波耦合，可进一步提升能效利用率与干燥均匀性[5] [35]。激光干燥研究正由试验研究阶段迈向机理可定量描述和工艺可预测化的新阶段。

面向前景，激光辅助涂布干燥的研究仍面临跨尺度建模、过程感知及能效集成等关键科学问题。通过构建包含光学传输、热-质耦合与结构演化的统一模型框架并实现从能量输入到涂层性能的全过程预测；发展高时空分辨率的原位监测技术并为模型验证与智能控制提供数据支撑；建立多参数协同优化与能效评价体系并推动激光干燥向绿色制造与智能生产的深度融合。随着激光器技术、智能控制算法与数

据驱动建模方法的不断成熟，激光辅助干燥有望成为高端涂布制造领域的重要基础工艺之一，在电子器件、功能薄膜与新能源材料等方向展现广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Routh, A.F. (2013) Drying of Thin Colloidal Films. *Reports on Progress in Physics*, **76**, Article ID: 046603. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/4/046603>
- [2] Keey, R.B. (1972) Drying: Principles and Practice. Pergamon Press. <https://books.google.co.jp/books/about/Drying.html>
- [3] Crank, J. (1975) The Mathematics of Diffusion. 2nd Edition, Oxford University Press. <https://global.oup.com/academic/product/the-mathematics-of-diffusion-9780198534112>
- [4] Poprawe, R., Boucke, K. and Hoffman, D. (2011) Tailored Light 1: High Power Lasers for Production. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-01234-1>
- [5] von Horstig, M., Schoo, A., Loellhoeffel, T., Mayer, J.K. and Kwade, A. (2022) A Perspective on Innovative Drying Methods for Energy-Efficient Solvent-Based Production of Lithium-Ion Battery Electrodes. *Energy Technology*, **10**, Article ID: 2200689. <https://doi.org/10.1002/ente.202200689>
- [6] Neb, D., Kim, S., Clever, H., Dorn, B. and Kampker, A. (2022) Current Advances on Laser Drying of Electrodes for Lithium-Ion Battery Cells. *Procedia CIRP*, **107**, 1577-1587. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.05.194>
- [7] Fink, S., Demir, D., Börner, M., Göken, V. and Vedder, C. (2023) High-Speed Laser Drying of Lithium-Ion Battery Anodes: Challenges and Opportunities. *World Electric Vehicle Journal*, **14**, Article No. 255. <https://doi.org/10.3390/wevj14090255>
- [8] Wolf, S., Garbade, L., Göken, V., Tien, R., Börner, M., Neb, D., et al. (2023) Process and Material Analysis of Laser- and Convection-Dried Silicon-Graphite Anodes for Lithium-Ion Batteries. *World Electric Vehicle Journal*, **14**, Article No. 87. <https://doi.org/10.3390/wevj14040087>
- [9] Citexs (2024) Bibliometric Analysis. <https://www.citexs.com>
- [10] Jaiser, S., Müller, M., Baunach, M., Bauer, W., Scharfer, P. and Schabel, W. (2016) Investigation of Film Solidification and Binder Migration during Drying of Li-Ion Battery Anodes. *Journal of Power Sources*, **318**, 210-219. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.018>
- [11] Goehring, L., Clegg, W.J. and Routh, A.F. (2013) Plasticity and Fracture in Drying Colloidal Films. *Physical Review Letters*, **110**, Article ID: 024301. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.110.024301>
- [12] Pfaffmann, L., Jaiser, S., Müller, M., Scharfer, P., Schabel, W., Bauer, W., et al. (2017) New Method for Binder and Carbon Black Detection at Nanometer Scale in Carbon Electrodes for Lithium Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **363**, 460-469. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.102>
- [13] Holl, Y., Keddie, J.L., McDonald, P.J. and Winnik, W.A. (2001) Drying Modes of Polymer Colloids. In: *ACS Symposium Series*, American Chemical Society, 2-26. <https://doi.org/10.1021/bk-2001-0790.ch001>
- [14] Keddie, J.L. and Routh, A.F. (2010) Drying of Latex Films. In: *Fundamentals of Latex Film Formation*. Springer.
- [15] Oron, A., Davis, S.H. and Bankoff, S.G. (1997) Long-Scale Evolution of Thin Liquid Films. *Reviews of Modern Physics*, **69**, 931-980. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.69.931>
- [16] Tsotsas, E. and Mujumdar, A.S. (2007) *Modern Drying Technology*, Volume 1: Computational Tools at Different Scales. Wiley-VCH.
- [17] Whitaker, S. (1977) Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying. In: *Advances in Heat Transfer*, Elsevier, 119-203. [https://doi.org/10.1016/s0065-2717\(08\)70223-5](https://doi.org/10.1016/s0065-2717(08)70223-5)
- [18] Kumberg, J., Müller, M., Diehm, R., Spiegel, S., Wachsmann, C., Bauer, W., et al. (2019) Drying of Lithium-Ion Battery Anodes for Use in High-Energy Cells: Influence of Electrode Thickness on Drying Time, Adhesion, and Crack Formation. *Energy Technology*, **7**, Article ID: 1900722. <https://doi.org/10.1002/ente.201900722>
- [19] Font, F., Protas, B., Richardson, G. and Foster, J.M. (2018) Binder Migration during Drying of Lithium-Ion Battery Electrodes: Modelling and Comparison to Experiment. *Journal of Power Sources*, **393**, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.04.097>
- [20] Ready, J.F. (1997) Effects of High-Power Laser Radiation. Academic Press. https://books.google.co.jp/books/about/Effects_of_High_Power_Laser_Radiation.html
- [21] Modest, M.F. (2013) Radiative Heat Transfer. 3rd Edition, Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780123869449/radiative-heat-transfer>
- [22] Incropera, F.P. and DeWitt, D.P. (2007) *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th Edition, Wiley.

- <https://www.wiley.com/en-cn/Fundamentals+of+Heat+and+Mass+Transfer%2C+8th+Edition-p-9781119353881>
- [23] Paddock, C.A. and Eesley, G.L. (1986) Transient Thermoreflectance from Thin Metal Films. *Journal of Applied Physics*, **60**, 285-290. <https://doi.org/10.1063/1.337642>
- [24] Yao, X.X. and Zhang, Z. (2022) Laser-Particle Interaction-Based Heat Source Model of Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Optics & Laser Technology*, **155**, Article ID: 108402. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108402>
- [25] Poprawe, R., Häfner, C. and Wester, R. (2011) Tailored Light 2: Laser Application Technology. Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-01237-2>
- [26] Deegan, R.D., Bakajin, O., Dupont, T.F., Huber, G., Nagel, S.R. and Witten, T.A. (1997) Capillary Flow as the Cause of Ring Stains from Dried Liquid Drops. *Nature*, **389**, 827-829. <https://doi.org/10.1038/39827>
- [27] Hu, H. and Larson, R.G. (2005) Analysis of the Microfluid Flow in an Evaporating Sessile Droplet. *Langmuir*, **21**, 3963-3971. <https://doi.org/10.1021/la047528s>
- [28] Cazabat, A. and Guéna, G. (2010) Evaporation of Macroscopic Sessile Droplets. *Soft Matter*, **6**, 2591-2612. <https://doi.org/10.1039/b92447h>
- [29] Jaiser, S., Kumberg, J., Klaver, J., Urai, J.L., Schabel, W., Schmatz, J., et al. (2017) Microstructure Formation of Lithium-Ion Battery Electrodes during Drying—An *Ex-Situ* Study Using Cryogenic Broad Ion Beam Slope-Cutting and Scanning Electron Microscopy (cryo-bib-sem). *Journal of Power Sources*, **345**, 97-107. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.01.117>
- [30] Stojanović, I., Logar, M., Fatović, I., Alar, V. and Rakela-Ristevski, D. (2023) Experimental Study of Atmospherically and Infrared-Dried Industrial Topcoats. *Coatings*, **13**, Article No. 1343. <https://doi.org/10.3390/coatings13081343>
- [31] Zhang, Y.S., Courtier, N.E., Zhang, Z., Liu, K., Bailey, J.J., Boyce, A.M., et al. (2021) A Review of Lithium-Ion Battery Electrode Drying: Mechanisms and Metrology. *Advanced Energy Materials*, **12**, Article ID: 2102233. <https://doi.org/10.1002/aenm.202102233>
- [32] Laserline GmbH (2021) VCSEL and Diode Laser Arrays for Industrial Drying Applications.
- [33] Turkan, B., Etemoglu, A.B. and Can, M. (2020) Analysis of Evaporative Drying of Thin Ink Films Using High-Velocity Hot-Air Impinging Jets: A Comprehensive Review. *Surface Review and Letters*, **27**, Article ID: 1950210. <https://doi.org/10.1142/s0218625x1950210x>
- [34] Kumberg, J., Baunach, M., Eser, J.C., Altvater, A., Scharfer, P. and Schabel, W. (2020) Investigation of Drying Curves of Lithium-Ion Battery Electrodes with a New Gravimetrical Double-Side Batch Dryer Concept Including Setup Characterization and Model Simulations. *Energy Technology*, **9**, Article ID: 2000889. <https://doi.org/10.1002/ente.202000889>
- [35] Altvater, A., Heckmann, T., Eser, J.C., Spiegel, S., Scharfer, P. and Schabel, W. (2022) (Near-) Infrared Drying of Lithium-Ion Battery Electrodes: Influence of Energy Input on Process Speed and Electrode Adhesion. *Energy Technology*, **11**, Article ID: 2200785. <https://doi.org/10.1002/ente.202200785>
- [36] Dias, B.S., Navalho, J.E.P. and Pereira, J.C.F. (2022) Multi-Scale Modeling and Simulation of IR Radiative Drying for Coil Coating Processes. *Drying Technology*, **40**, 3466-3482. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2055055>
- [37] von Horstig, M., Zhang, C., Ventura Silva, G., Michalowski, P., Herrmann, C. and Kwade, A. (2025) Induction vs. Laser Heating: A Comparative Study on Innovative Electrode Drying Technologies on Pilot-Scale. *Journal of Power Sources*, **654**, Article ID: 237780. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237780>
- [38] Antonelli, R. and Kodger, T.E. (2023) Light Scattering through a Drying Coating. *Coatings*, **13**, Article No. 1873. <https://doi.org/10.3390/coatings13111873>
- [39] Schütte, M., Degen, F. and Walter, H. (2024) Reducing Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Industrial Drying Processes in Lithium-Ion Battery Cell Production: A Qualitative Technology Benchmark. *Batteries*, **10**, Article No. 64. <https://doi.org/10.3390/batteries10020064>
- [40] Karniadakis, G.E., Kevrekidis, I.G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S. and Yang, L. (2021) Physics-informed Machine Learning. *Nature Reviews Physics*, **3**, 422-440. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>