

助力实现第九项可持续发展目标: 运用 3D 打印推动化工行业可持续发展

Marwan Khayyat^{1,2}, Egor Milovanov^{1,2}, Vinicius dos Santos^{1,2} 和 Carlos A. Grande^{1,2*}

¹阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST), 材料与工艺强化实验室 (沙特阿拉伯, 图沃)

²阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST), 物理科学与工程部 (PSE), 化学工程 (沙特阿拉伯, 图沃)

少年审稿人



ANNAMARIA

年龄: 14



DEAN

年龄: 14



ISABELA

年龄: 14



MERYEM

年龄: 14

产业 (Industries)

生产产品或服务的“工厂”。

联合国第九项可持续发展目标 (产业、创新和基础设施) (SDG 9) 旨在确保以可持续方式生产物资。制造日常用品需要用到各类设备与化学品, 这并非易事。全球数百万人在名为“化工行业”的巨大“厨房”中工作, 通过制备和混合原料生产从玩具塑料、服装面料到治病药品等各种物品。要实现可持续性, 所有产业都必须减少能源与材料消耗以及废弃物产生量。应对这项挑战需要新的生产方式和新型制造设备! 好消息是我们已掌握了一些高科技替代方案。本文将阐述 3D 打印如何助力产业提升效率、安全性和环保性。观看本文作者的专访视频, 获取更多精彩内容! ([视频 1](#))。

工厂与环境

日常生活中使用的衣物、玩具、药品乃至食品大多产自工厂。科学家用“产业”统称工厂, 并根据产品类型区分产业: 例如化工产业生产几乎所有日用物品的材料, 而作为化工分支的制药行业则专攻药物生产。某些化工产业的运作方式酷似厨房: 通过不同食材、配方和设备制作特定

药物 (Pharmaceutical)

用于医疗目的的任何药物。

图 1

工厂生产原理。(A) 做蛋糕与 (B) 制药很相似: 从初始材料 (食材/化合物) 开始, 灰色方框表示原料在变为蛋糕或药片等成品之前经历的所有转化步骤。两个过程均消耗能源并产生废弃物——做蛋糕会产生蛋壳和空面粉袋, 制药则会排放二氧化碳 (CO₂) 并产生破损不可用的药片。

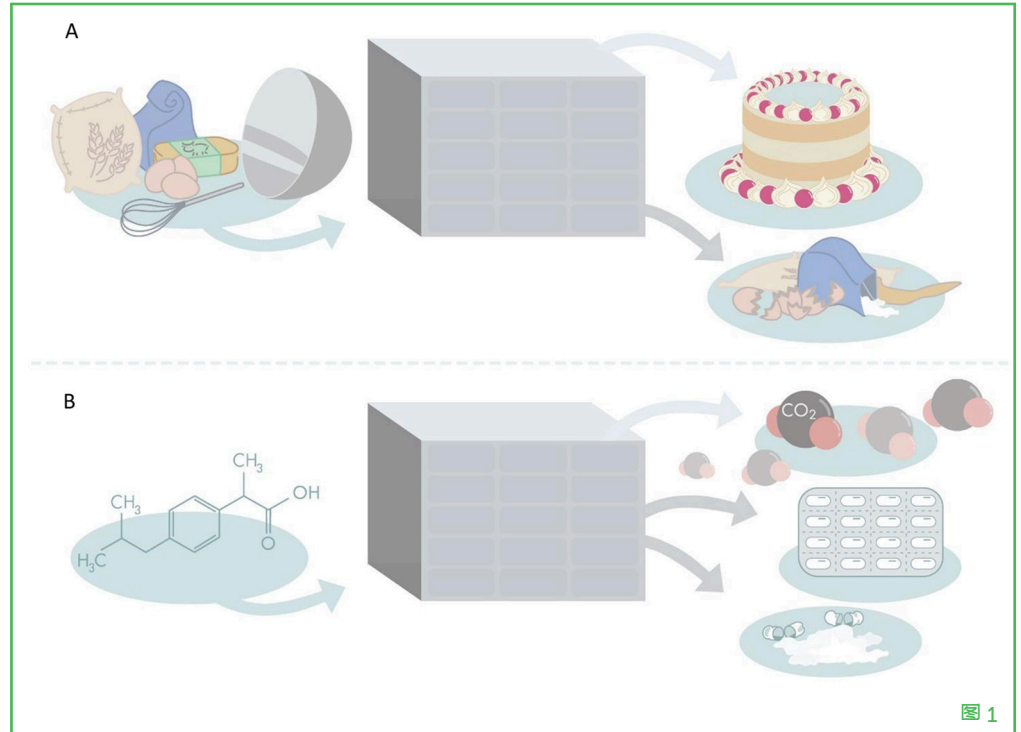


图 1

某些化工行业的生产方法也会消耗大量能源与材料 (图 1B)。由于没有完美工艺, 部分元素未能转化为有价值产品, 并且经常产生废弃物。以这种方式生产的产品缺乏可持续性, 会破坏地球环境。在药品和疫苗生产中, 重点往往在于拯救生命, 通常会忽视废弃物数量和二氧化碳排放问题。然而, 随着地球气候逼近临界点, 我们必须减少所有产品 (包括必需品) 生产过程中的材料消耗与排放。

第九项可持续发展目标 (产业、创新和基础设施, 简称 SDG 9) 是联合国为守护地球健康制定的 17 项目标之一 [1]。该目标要求产业采用可持续经营方式, 各国应投资改善道路、桥梁等基础设施并提供清洁水、高速网络等基础服务, 以增强社区。满足这些要求需要众多科技创新, 并且鉴于气候变化的全球性, 应确保所有国家都能从高效新技术中受益。通过完善基础设施和支持创新, 我们能创造更多就业岗位, 支持企业发展, 提升全民生活质量。该领域的进步也会推动实现其他 SDG 目标, 例如平价药物有助于实现 SDG 3 (确保健康生活), 改进药物生产方法有助于实现 SDG 12 (确保可持续消费与生产)。

为支持 SDG 9, 产业应采取与家庭环保相似的行动: 减量、复用、循环。产业应减少产品制造中的能源与材料消耗, 产品使用后应可回收。开发减量、复用、循环的新方法需要投入资金, 但如果什么也不做, 气候变化和环境破坏的恶果将使我们付出更高昂的代价。

可持续 (Sustainable)

通过减少材料消耗、重复利用资源以及将旧物转化为新产品的方式帮助地球减轻负担。

基础设施 (Infrastructure)

保障组织良好运转的基础系统与服务。

制造技术的发展

科学技术在过去几年飞速发展。如今常见的手机和互联网,在你们祖辈和父辈的童年时期根本不存在。工业设备造价昂贵,使用寿命长达数十年。如果机器的效率低而寿命长,将会拖慢更新换代的节奏。例如,某些化肥生产设备通常会正常运转 40-50 年。虽然各行业的机器和工艺升级速度不同,但未来几年都需转向更可持续的方式。

以拥有数百万从业者的制药行业为例:其产品让社会更健康、人类寿命更长。制药业生产我们生病时服用的药物,其生产过程类似烹饪(图 1)。工厂使用名为“**反应器**”的容器(相当于锅具),将各种化学品转化为药物。这种转化需要时间,通常会生产含有无益或无用化合物的混合物。生产与**提纯**过程会消耗大量材料和资金,还会产生大量废弃物:平均每售出 1 公斤药物,就会产生超过 25 公斤废弃物 [2]。特定疾病药物的生产环节更多,通常会生产更多废弃物,这也是药价昂贵的原因之一。有没有更好的方法来生产人人所需的药物呢?

改进制造方式

要想让全球更多人获得药物,就需要成本更低的可持续生产方式,但我们不能牺牲质量:必须在降低制药成本的同时维持药品的质量、安全性和疗效。由于制药行业的质量标准极高,生产时通常分阶段在不同反应器中进行化学转化(图 2A),以免在发生工艺故障时损失全部原料,也便于在出现不良反应时从市场撤回问题批次药品——这就是所有药盒都标有

反应器 (Reactors)

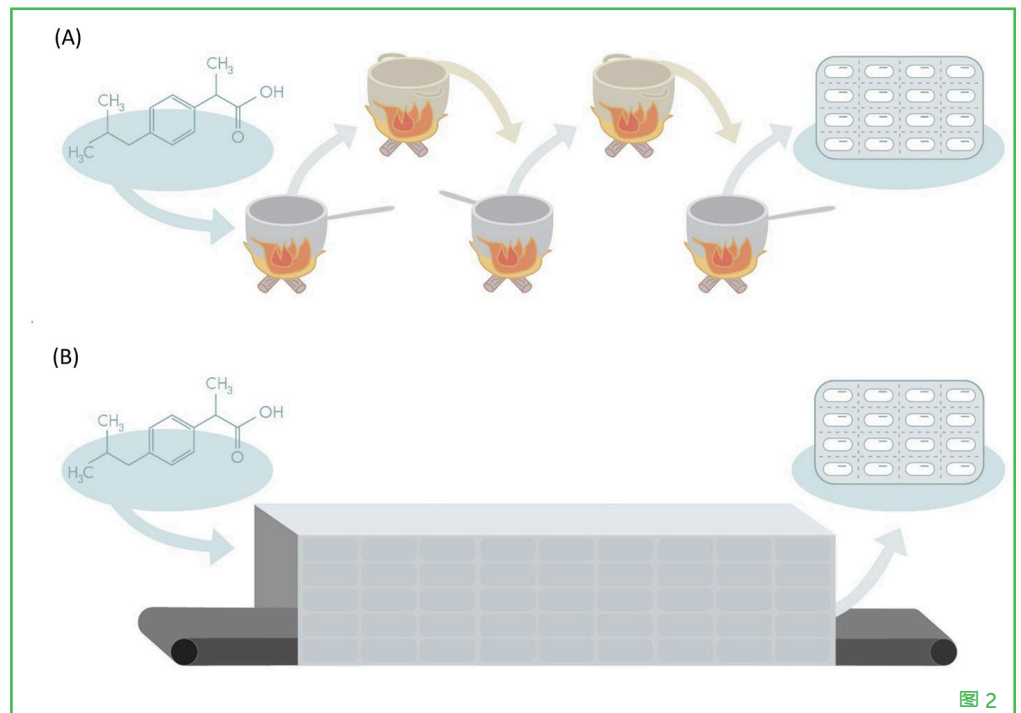
通过混合物质创造新物质的专用机器,通常需在高温下运转。

提纯提纯 (Purification)

从混合物中筛选所需成分的过程。

图 2

不同药物生产方法对比:
(A) 使用常规反应器进行批次生产时,某些药物耗时较长,包含大量提纯环节,大型设备还难以实现充分混合与恒温控制。
(B) 针对这些挑战,科学家开发出连续生产工艺,反应器内的化学物质混合更快速,整个流程控制更精准,生产更紧凑高效,同时精简提纯环节。



连续制造 (Continuous manufacturing)

永不停止地重复制造相同产品的生产方式。

分形反应器 (Fractal reactor)

一种具有多弯道结构的装置,通过增加物质碰撞频率生成新物质。

图 3

(A) 3D 打印如同用裱花袋装饰蛋糕:一边移动一边挤压装有奶油的裱花袋,可形成不同图案。3D 打印时,打印机喷出液态材料,接触较冷表面后凝固成型。(B) 采用透明塑料进行 3D 打印的分形反应器。通过局部放大可以看到反应器内部混合化学物质的微细空管,借助多重弯道使分子转化生成目标化学品。(使用 BioRender 制成的图片)。

分子 (MOLECULE)

任何物质的最小单元(H_2O 代表一个水分子)。

3D 打印 (3D printing)

依照计算机设计图逐层堆叠制造实物的技术,类似用积木搭建房屋。

批号的原因。名为“连续生产”的新工艺通过其他方式控制反应和药品生产质量,避免了批次生产模式(图 2B) [4],还能加快药物生产!但如何制造连续生产反应器呢?

3D 打印 —— 制造技术新纪元

就像在做菜时把握风味一样,某些化学反应难以精确控制。例如,温度过高易导致食物烧焦或风味不佳,这是因为发生了不良化学反应。在药物生产过程中,如果温度控制不当,可能会产生有毒化合物。这仅是众多生产难题之一,虽然现在有一些解决方案,但大多需要消耗更多资源或延长工期,导致产品价格高昂。

图 3 展示了我们研发的分形反应器 [3]。分形是一个数学概念,指由重复图案组成的形状(如树木分枝结构)。分形反应器能以更快、更可持续的方式生产特定药物。最妙的是我们可以轻松调整反应器形状,从而优化反应器结构,减少制造产品时的资源和能源消耗。

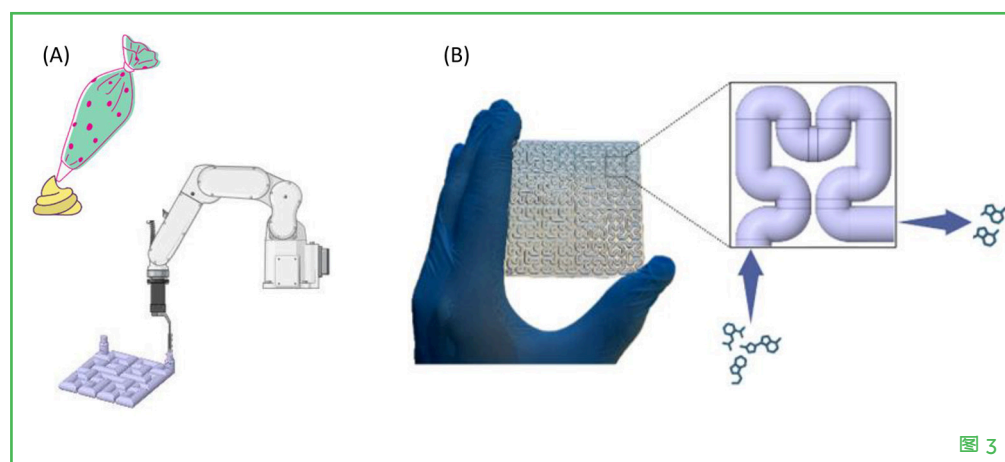


图 3

3D 打印可为涉及复杂反应的连续生产工艺打造分形反应器,其一大优势在于能制造出以往无法实现的复杂结构。我们的研究团队通过开发新型反应器来控制复杂反应,例如以更安全的方式处理危险酸类,并且设备体积较以往更紧凑 [4]。这就像挑选服装,我们根据具体情境挑选合适的尺寸与特性!毕竟没必要穿西装打领带去冲浪!

未来产业

产业是人类福祉的支柱和社会发展的基石。SDG 9 旨在推动各国全力提升所有产业的可持续性。3D 打印等新技术可帮助产业以更少资源、更少废弃物和更少碳排放制造产品。在制药行业,3D 打印可在保障质量的同时加快重要药物的生产速度。我们可通过选择以可持续方式生产的

产品给予支持。大家还可以发挥想象力, 提出更能造福地球与人类的制造方式!

致谢

谨向阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST) 的 Ruben Costa 与 Nicki Talbot 致以诚挚谢意, 感谢他们在初始撰写和审校阶段提供的宝贵支持, 本系列的完成离不开他们的专业贡献。同时向联合国开发计划署沙特阿拉伯国家办公室表示谢意, 感谢他们始终致力于提升公众对联合国可持续发展目标 (SDG) 的认知, 共同推动世界走向更可持续的未来。本研究项目由 KAUST 资助。作者感谢 Ana Bigio 绘制 图 1、2。

AI 人工智能工具使用声明

本文中所有图表附带的替代文本 (alt text) 均由 Frontiers 出版社在人工智能支持下生成。我们已采取合理措施确保其准确性, 包括在可行情况下经由作者审核。如发现任何问题, 请随时联系我们。

参考文献

1. United Nation 2015. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. Available at: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
2. Sheldon, R. A. 2017. The E factor 25 years on: the rise of green chemistry and sustainability. *Green Chem.* 19:1843. doi: 10.1039/C6GC02157C
3. Grande, C. A. 2021. Compact reactor architectures designed with fractals. *React. Chem. Eng.* 6:144853. doi: 10.1039/D1RE00107H
4. Grande, C. A., and Didriksen, T. 2021. Production of customized reactors by 3D printing for corrosive and exothermic reactions. *Indus. Eng. Chem. Res.* 60:167207. doi: 10.1021/acs.iecr.1c02791

线上发布: 2025 年 11 月 05 日

编辑: Derya Baran

科学导师: Nicki Talbot

引用: Khayyat M, Milovanov E, Santos Vd 和 Grande CA (2025) 助力实现第九项可持续发展目标: 运用 3D 打印推动化工行业可持续发展. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2025.1487575-zh

英文原文: Khayyat M, Milovanov E, Santos Vd and Grande CA (2025) Towards SDG 9: Using 3D Printing to Make Chemical Industries More Sustainable. *Front. Young Minds* 13:1487575. doi: 10.3389/frym.2025.1487575

利益冲突声明: 作者声明本研究不涉及任何潜在商业或财务关系。

版权 © 2025 © 2025 Khayyat, Milovanov, Santos 和 Grande. 这是一篇依据 [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#) 条款发布的开放获取文章。根据公认的学术惯例，在注明原作者和版权所有者，及在标明本刊为原始出处的前提下，允许使用、传播、复制至其他平台。如违反以上条款，则不得使用、传播或复制文章内容。

少年审稿人



ANNAMARIA, 年龄: 14

大家好, 我是 Annamaria, 目前就读于 KAUST 附属学校 (TKS), 喜欢游泳、热爱海滩、痴迷读书, 还养了一只名叫 Tiger 的橘猫。



DEAN, 年龄: 14

我是 Dean, 在 KAUST 附属学校读九年级, 喜欢读书、看电视、学习还有和猫咪玩耍。我充满创造力, 属于视觉型学习者。



ISABELA, 年龄: 14

我是 Isabela, 正在 TKS 读九年级。作为视觉型学习者, 我喜欢攀岩、绘画和体操等实践性活动。



MERYEM, 年龄: 14

我对科学、数学和如何解决问题充满兴趣, 很喜欢探索应对现实挑战的解决方案, 不断拓展自己的认知边界。我参加了爱丁堡公爵奖项目, 业余时间喜欢拉小提琴和读书。

作者



MARWAN KHAYYAT

Marwan Khayyat 拥有阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST) 液体吸附化学工程硕士学位, 现任沙特阿美公司工艺与控制系统部芳烃工艺工程师。作为沙特资深专业工程师, 他拥有超过 10 年的从业经验, 熟知如何利用模拟移动床技术生产对二甲苯。



EGOR MILOVANOV

Egor Milovanov 现为 KAUST 化学工程专业博士生, 师从 Carlos A. Grande 教授, 在流体设备开发与实验研究方面经验丰富。他持有 KAUST 化学工程硕士学位和新西伯利亚国立大学应用物理学学士学位, 擅长参数化计算机辅助设计、COMSOL 流体与化学反应模拟、光谱化学可视化实验, 曾主导学生项目与活动, 展现出卓越的团队协作与沟通能力。



VINICIUS DOS SANTOS

Vinicius dos Santos 目前正在攻读 KAUST 化学工程博士学位, 本科毕业于巴西化学工程专业, 研究方向为开发强化反应器, 突破输送现象限制。



CARLOS A. GRANDE

Carlos A. Grande 自 2021 年起担任 KAUST 副教授, 此前在挪威 SINTEF 研究院工作 10 年, 持有葡萄牙波尔图大学化学工程博士学位、阿根廷南方大学化学工程学士学位。他致力于开发用于化工与制药产业的可持续分离及反应技术, 并带领团队运用 3D 打印技术探索可重塑未来产业的创新几何结构。*carlos.grande@kaust.edu.sa

中文翻译由下列单位提供

Chinese version provided by

