

论文解读：受深海玻璃海绵启发的过滤器用于湍流条件下油类污染物清除

论文信息

- 标题:** A filter inspired by deep-sea glass sponges for oil cleanup under turbulent flow
- 作者:** Yuan Yu, Chi Ding, Jinna Zhang, Nanqi Ren, Chuyang Y. Tang & Shijie You
- 期刊:** 《自然通讯》 (Nature Communications)
- 链接:** <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55587-y>

摘要解读

1. 研究背景与问题

- 石油泄漏的危害:** 石油泄漏事故对社会、经济、环境和生态造成广泛而持久的影响。
- 现有技术的挑战:** 传统的静态吸附技术在复杂水流条件下存在流体动力学不稳定性问题，导致油类捕集效率低、时间延迟和油类逃逸。

2. 仿生设计灵感

- 深海玻璃海绵的启发:** 研究团队从深海玻璃海绵 (*Euplectella aspergillum*) 的解剖结构中获取灵感，模仿其独特的骨骼结构和滤食模式。
 - 深海玻璃海绵能够在极端环境下生存，其骨骼结构具有优异的流体动力学特性。
 - 这种结构能够将外部湍流能量转化为内部低速涡流，从而提高界面传质效率和停留时间。

3. 技术设计与创新

- 涡流锚固过滤器 (Vortex-anchored filter, VAF) :**
 - 通过模仿玻璃海绵的骨骼特征，设计了一种新型过滤器。
 - 该过滤器能够将外部湍流动能保留在骨架腔内的低速涡流中，形成较小的Kolmogorov微尺度 ($85\text{ }\mu\text{m}$) 。
 - 这种设计通过物理场协同机制增强了界面传质效率和停留时间。
- 流体动力学稳定性:**
 - 过滤器通过减少雷诺应力 (Reynolds stresses) 在近乎静止的尾流中提高了流体动力学稳定性。

4. 实验结果与性能

- 高效捕集:**
 - VAF能够在亚临界到超临界雷诺数范围内稳定捕集浮油、水下油和乳化油，捕集率超过97%。
- 关键优势:**
 - 提高了界面传质效率和流体动力学稳定性。
 - 延长了油类在过滤器内的停留时间。

5. 研究意义与贡献

- 科学意义:**
 - 揭示了涡流锚固机制在增强界面传质和流体动力学稳定性方面的重要性，超越了以往仅关注停留时间的认知。
- 技术突破:**
 - 提出了一种基于生物物理启发的策略，用于原位、动态和鲁棒的油类清除、环境修复和资源回收。
- 应用前景:**
 - 该技术为解决复杂水动力条件下的石油泄漏问题提供了全新的解决方案，具有广泛的应用潜力。

6. 研究团队与支持

- 作者团队:**
 - 第一作者：于源 (Yuan Yu)
 - 通讯作者：尤世界 (Shijie You)
 - 其他作者：Chi Ding, Jinna Zhang, Nanqi Ren, Chuyang Y. Tang
- 支持机构:**
 - 国家自然科学基金、中国博士后基金、黑龙江省博士后基金。

引言部分解读

1. 石油泄漏问题的背景

- 石油泄漏的普遍性:** 石油泄漏可能发生在石油钻探、加工、储存和运输的任何环节。
- 影响范围:** 石油泄漏会污染周围水体，影响范围可达泄漏量的数千倍，对社会、经济、环境和生态造成广泛而持久的影响。
- 现有技术:** 目前常用的方法是使用亲油性吸附材料进行原位捕集泄漏的石油。例如，在2010年深水地平线事故和2023年MT Princess Empress事故中，使用了由聚硅氧烷、有机硅烷、聚丙烯和聚氨酯等亲油性聚合物改性的吸附浮筒。
- 技术挑战:** 这些技术对水流波动敏感，导致机械强度、界面传质和油类捕集效率的严重下降，尤其是在油水乳状液的情况下，如管道泄漏和海上工业排放。

2. 自然界的启发

- **生物启发的策略:** 许多研究报道了从自然界中获取灵感的设计策略，如蜘蛛网、海洋贻贝、猫舌和猪笼草等，用于设计超疏水材料和界面。
- **现有研究的局限性:** 这些研究主要集中在改变界面性质和传质模式（如疏水性/亲水性和疏油性/亲油性），但其流体动力学稳定性尚不明确。低流体动力学鲁棒性会导致油类捕集效率低、时间延迟和油类逃逸，尤其是在湍流条件下。

3. 深海玻璃海绵的启发

- **深海玻璃海绵的特殊结构:** 深海玻璃海绵（如*E. aspergillum*或维纳斯花篮）因其特殊的结构引起了研究团队的关注。与浅水海绵不同，深海海绵在复杂的流动、稀缺的营养和浅层锚固的深海环境中生存。
- **滤食机制:** *E. aspergillum*通过其机械结构实现高效、选择性和鲁棒的滤食。具体来说，*E. aspergillum*具有多层骨架-鞭毛结构，当水流通过海绵体时，多角度支柱产生3D流线，频繁碰撞、偏转、汇聚和分离，从而将宏观湍流耗散为体内的小尺度低速涡流。
- **流体动力学优势:** 这种涡流模式减少了流体动力学负荷，通过鞭毛捕获营养物质并保持机械稳定性，使*E. aspergillum*能够在太平洋和南极洲的100至1000米深处通过自然选择繁衍生息。

总结

引言部分详细介绍了石油泄漏问题的背景和现有技术的挑战，强调了从自然界中获取灵感的重要性，特别是深海玻璃海绵的特殊结构和滤食机制为设计新型油类捕集技术提供了重要启示。

仿生设计与技术实现

1. 深海玻璃海绵的骨骼结构

- ***E. aspergillum*的骨骼结构:** 深海玻璃海绵（*E. aspergillum*）的骨骼结构为设计油类捕集过滤器提供了优雅的生物物理灵感。其食物颗粒与油滴具有相似性，因此其滤食模式对油类捕集具有重要启示。
- **仿生设计:** 通过模仿*E. aspergillum*的滤食模式，研究团队设计了一种仿生涡流锚固过滤器（Vortex-anchored filter, VAF），其核心结构包括仿生空心圆柱（BC）骨架和鞭毛吸附剂。

2. 油类捕集矩阵的模型

- **不同骨架结构的模型:** 研究团队设计了多种骨架结构的油类捕集矩阵，包括：
 - 实心板（SP）
 - 实心圆柱（SC）
 - 网格空心圆柱（GC）
 - 棋盘空心圆柱（CC）

- 螺旋脊网格空心圆柱 (HC)
- 仿生空心圆柱 (BC)
- **骨架结构的影响:** 通过对比不同骨架结构在超临界状态下的流动模式、流速大小和吸附区域离散节点的压力, 研究团队发现仿生空心圆柱 (BC) 结构在流体动力学稳定性和界面传质效率方面表现最佳。

3. 涡流锚固流场的理论优势

- **增强界面传质:** 低速涡流可以促进浓度梯度和速度之间的场协同效应, 从而在过滤水油混合物时通过增加停留时间更有效地捕集油类。
- **提高流体动力学稳定性:** 通过耗散水流动能并减弱近乎静止尾流中的拖曳力, 油类捕集矩阵的流体动力学稳定性显著提高, 使其对粘性流体边界层分离产生的弯曲应力具有高度抵抗力。

4. 仿生涡流锚固过滤器 (VAF) 的设计目标

- **应用场景:** VAF旨在用于湍流条件下的原位、动态和鲁棒的油类清除。
- **设计灵感:** 通过借鉴深海玻璃海绵的骨骼特征和滤食模式, 研究团队开发了一种能够在复杂水动力条件下高效捕集油类的仿生过滤器。

结果部分解读：仿生涡流锚固过滤器 (VAF) 的设计

1. 仿生设计原理

- **灵感来源:** 研究团队从深海玻璃海绵 (*E. aspergillum*) 的滤食模式中获取灵感, 设计了一种仿生涡流锚固过滤器 (Vortex-anchored filter, VAF), 模仿了*E. aspergillum*的外骨骼和内鞭毛结构。
- **外骨骼功能:** 外骨骼由螺旋脊和棋盘格结构组成, 主要功能是在腔体内形成低速涡流场和尾流中的静止区域, 从而在湍流条件下实现高效的界面传质和流体动力学稳定性。
- **内鞭毛吸附剂:** 内鞭毛形吸附剂提供了较大的界面面积用于油类吸附。研究团队将疏水性三聚氰胺树脂嵌入到由不锈钢3D打印的骨架内壁中。

2. 螺旋脊和棋盘格结构的关键作用

- **结构优化:** 在3D打印VAF之前, 研究团队通过格子玻尔兹曼模拟对骨架结构的网格宽度 (L) 和支柱位置 (S/L) 进行了优化, 以揭示其流体动力学机制。
 - **骨架设计:** 骨架结构设计为高度 $16L$ 、直径 $10L$, 螺旋脊设计为由 L 宽度的半八面体组成的对角环结构。
 - **优化目标:** 通过优化 L 和 S/L 的值, 使腔体内的流动涡度最大化, 尾流中的流速最小化。
 - **优化方法:** 使用协方差矩阵自适应进化策略 (CMA-ES) 算法在超临界状态 (雷诺数为 10^5) 下进行优化。

3. 结构优化结果

- 流体动力学特征:** 骨架结构对流体动力学特征具有重要影响。某些不良结构不仅阻碍了内部涡流的生成，还破坏了尾流的稳定性，甚至导致涡街脱落。
- 网格宽度 (L) 的影响:** 网格宽度 (L) 对流动模式的影响较小，L的变化仅导致涡度变化不超过27%。
- 最终设计参数:** 基于优化结果，研究团队设计了 $L=5\text{ mm}$ 、 $S/L=0.3$ 的VAF，其总几何尺寸为直径5 cm、高度8 cm，成功模拟了*E. aspergillum*滤食模式背后的涡流锚定流场。

4. 仿生VAF的设计目标

- 应用场景:** VAF旨在在湍流条件下实现高效的油类捕集，通过模仿深海玻璃海绵的骨骼结构和滤食模式，解决了传统技术在复杂水动力环境下的性能不足问题。
- 技术优势:** VAF通过优化骨架结构，实现了高界面传质效率和流体动力学稳定性，为油类污染的原位清除提供了全新的解决方案。

结果部分解读：流场的平滑性与均匀性

1. 流场对油类捕集的重要性

- 流场的作用:** 流场的平滑性和均匀性对动态油类捕集至关重要。研究团队通过对比六种骨架结构（实心板SP、实心圆柱SC、网格空心圆柱GC、棋盘空心圆柱CC、螺旋脊网格空心圆柱HC和仿生空心圆柱BC）的流场特性，评估了吸附区域的流速 (V) 和压力 (P) 分布。

2. 流场分析方法

- 实验设置:** 在VAF的中部水平截面上进行流场分析，吸附区域为空心结构的腔体区域或实心结构的外围区域。通过离散节点的流速和压力分布评估流场的平滑性，并通过变异系数 (CV) 评估均匀性。
- 变异系数 (CV):** CV定义为标准差与平均值的比值，CV的绝对值越大，表示数据分布越分散。

3. 流速与均匀性分析

- 流速衰减:** 仿生空心圆柱 (BC) 骨架通过开放孔隙将流速降低了一个数量级，即使在超临界状态 ($Re=10^5$, $V=350\text{ cm/s}$) 下，BC仍能将腔体内的流速衰减至23 cm/s，显著减少对鞭毛形吸附剂的干扰。
- 均匀性对比:** BC骨架在超临界状态下表现出更均匀的流速分布 (CVv低至0.15)，而实心圆柱 (SC) 和实心板 (SP) 骨架的CVv随Re值增加显著上升 (从0.8增至1.5)，表明其流速分布离散且不均匀。
- 其他空心结构的不足:** 其他空心结构 (GC、CC和HC) 由于缺乏螺旋脊和棋盘格结构，导致腔体内反向流线显著减少，CVv值增加近3倍 (CC为0.5, HC为0.4)。

4. 压力分布分析

- **负压吸引:** BC骨架在腔体内形成涡流诱导的负压分布，物理上吸引油类移动到吸附剂表面。
- **压力均匀性:** BC骨架的压力分布均匀 ($|CVp| < 0.2$)，而SC和SP结构产生正负压力交替分布，可能导致油-固接触不足和吸附剂材料利用率低。
- **其他空心结构的压力分布:** 其他空心结构 (GC、CC和HC) 由于稀疏的涡流和非均匀的压力分布 ($|CVp| > 1.0$)，无法实现稳定的油类捕集。

5. 仿生设计的优势

- **流体动力学条件:** 通过模仿E. aspergillum的螺旋脊和棋盘格结构，BC骨架在亚临界到超临界雷诺数范围内创造了适合稳定油类捕集的流体动力学条件。
- **技术突破:** BC骨架的仿生设计不仅显著降低了流速，还实现了流场的平滑性和均匀性，为高效油类捕集提供了理想的环境。

结果部分解读：传质增强与油类捕集效率

1. 不同油水状态下的传质研究

- **实验与模拟:** 研究团队通过实验和模拟研究了仿生涡流锚固过滤器 (VAF) 在不同油水状态 (溶解油、浮油和乳化油) 下的传质过程。实验在0–350 cm/s的水流速度范围内进行，模拟基于格子玻尔兹曼方法 (Lattice Boltzmann method) 进行。
- **雷诺数范围:** 模拟涵盖了从亚临界到超临界 ($Re = 10^2$ 到 10^5) 的广泛雷诺数范围，分别采用单相流和多相流模型。

2. 浮油和乳化油的传质模式

- **负压吸引效应:** 仿生空心圆柱 (BC) 骨架通过腔体内的涡流产生负压，直接吸引油滴，增强了油-固界面接触。这种效应与Fujiki等人报道的浮力颗粒向涡流聚集的现象一致。
- **吸附剂利用率:** BC骨架的吸附剂利用率接近100%，而实心板 (SP) 和实心圆柱 (SC) 的利用率分别仅为30%和20%。
- **捕集效率:** BC骨架在每种雷诺数下对乳化油和浮油的捕集效率均超过97%，泄漏到下游静止区域的油量低于3%。相比之下，SC骨架在 $Re = 10^2$ 时的捕集效率低于54%，在 $Re = 10^5$ 时进一步下降至22%。

3. 溶解油的传质量化

- **舍伍德数 (Sh):** 通过计算溶解油的内浓度场，研究团队量化了传质效率。BC骨架的Sh值 (5-6) 约为SP (3.3–4) 和SC (2.5–3.5) 的两倍。
- **捕集效率:** 在 $Re = 10^5$ 时，BC骨架对溶解油的捕集效率达到98%，分别是SP (28%) 和SC (16%) 的4倍和6倍。

- **其他空心结构的不足:** 缺乏螺旋脊和棋盘格结构的其他空心结构（GC、CC和HC）在亚临界状态下的捕集效率也低于30%。

4. 停留时间的影响

- **停留时间的量化:** 研究团队从涡度场中推导出无量纲停留时间（ t_{Non} ），作为油类在骨架腔体内停留时间的度量。
- **停留时间对比:** BC骨架的最大 t_{Non} 值（9.8）比SC骨架（1.6）高出一个数量级。CC、GC和HC的最大 t_{Non} 值分别为5.3、2.6和2.3，表明停留时间依赖于螺旋脊和棋盘格结构相关的涡流锚定流场。
- **传质机制:** 这种传质机制类似于实验室中常见的搅拌现象，BC骨架将传质从传统的宏观拦截模式转变为由离散小尺度涡流驱动的原位搅拌模式。

5. 仿生设计的综合优势

- **高效传质与捕集:** BC骨架通过均匀的涡流锚定流场增强了传质效率，实现了对浮油、乳化油和溶解油的高效捕集。
- **广泛适用性:** 该设计在从亚临界到超临界的广泛雷诺数范围内表现出卓越的流体动力学稳定性和油类捕集效率。

结果部分解读：流体动力学鲁棒性

1. 流体动力学稳定性的重要性

- **关键作用:** 流体动力学稳定性是复杂水流环境下实现鲁棒油类清除的关键。流体动力学不稳定会导致操作不灵活、不精确，并不可逆地降低传质效率和油类捕集效率。
- **评估指标:** 研究团队通过压降（ ΔP ）、阻力系数（ D_c ）和实验测量的摆动角度（ θ_{sw} ）来评估不同骨架结构的流体动力学稳定性。

2. 仿生空心圆柱（BC）骨架的稳定性

- **稳定姿态:** BC骨架在亚临界、临界和超临界流态下均保持垂直稳定，这归因于其较低的压降（ ΔP ）和阻力系数（ D_c ）。
- **压降对比:** BC骨架的 ΔP （0.007–800 Pa）比实心圆柱（SC）骨架（0.3–50000 Pa）低至少一个数量级（图3c）。
- **阻力系数对比:** BC骨架的 D_c 值（1.2–0.4）约为SC骨架（1.8–1.6）的一半（图3d）。

3. 实心圆柱（SC）骨架的不稳定性

- **摆动现象:** SC骨架在超临界流态下沿流动方向摆动，摆动角度（ θ_{sw} ）从 20° （ $Re=10^2$ ）增加到 50° （ $Re=10^5$ ）（图3b, e）。

- **涡流脱落:** 在湍流条件下 ($Re=10^4-10^5$) , SC骨架后方明显可见涡流脱落现象。

4. 其他空心骨架的流体动力学表现

- **高压降问题:** 缺乏棋盘格结构的骨架 (GC和HC) 在所有雷诺数下均承受较高的 ΔP (0.08–5000 Pa) , 导致阻力系数 (D_c) 增加, 尤其是在强湍流条件下 ($Re=10^4-10^5$) , D_c 值超过1.5 (图3c, d) 。
- **螺旋脊的影响:** 移除螺旋脊的CC骨架的 D_c 值略有下降 (幅度为0.1) , 表明螺旋脊对流体阻力的贡献较小。然而, 这种微小影响并未显著削弱BC骨架的流体动力学鲁棒性。

5. 综合优势

- **结构稳定性与传质效率的平衡:** BC骨架通过螺旋脊和棋盘格结构的结合, 在层流、过渡流和湍流条件下实现了流体动力学鲁棒性、传质效率和结构稳定性的最佳平衡。
- **广泛应用潜力:** BC骨架的稳定性和高效性使其成为复杂水动力环境下油类清除的理想解决方案。

结果部分解读：流体动力学机制与传质增强

1. 仿生设计的流体动力学机制

- **灵感来源:** 研究团队从深海玻璃海绵 (*E. aspergillum*) 的捕食策略中获取灵感, 揭示了仿生空心圆柱 (BC) 骨架在传质和流体动力学鲁棒性方面的机制。深海玻璃海绵通过其独特的骨骼结构和滤食模式, 能够在复杂的深海环境中高效捕食营养物质。这种自然界的优化结构为设计高效的油类捕集过滤器提供了重要启示。
- **涡流锚定机制:** 研究假设涡流锚定机制通过物理场协同效应 (physical field synergy) 实现了传质增强和流体动力学稳定性。涡流锚定机制通过将外部湍流能量转化为内部低速涡流, 减少了流体动力学负荷, 同时增强了油类与吸附剂之间的界面传质效率。

2. 涡流场与物理场协同效应

- **涡流场与协同角的关系:** 通过分析涡流场和局部协同角 (θ_s) , 研究发现高涡度区域对应较小的协同角 (θ_s) , 表明水流与吸附剂之间的传质效率更高 (图4a, b) 。协同角 (θ_s) 是流速矢量与浓度梯度之间的夹角, 较小的 θ_s 意味着更高效的传质。
- **舍伍德数 (Sh) 与协同角的关系:** Sh值与体积加权平均协同角 (θ_V) 呈正相关。当 θ_V 从65°降至15°时, BC骨架的Sh值从3增加到7.5, 表明通过优化流场模式实现物理场协同效应可以显著增强传质 (图4c) 。Sh值是传质效率的无量纲指标, 较高的Sh值表明更高效的传质过程。

3. 不同骨架结构的协同效应对比

- **实心圆柱 (SC) 骨架:** SC骨架在后方形成大尺度涡流 (Kolmogorov微尺度 $K_m=425 \mu m$) , 但由于水流偏转, 油类难以接近吸附区域。尽管 $\theta_s < 45^\circ$ 的区域占吸附位点的30%, 但在超临界流态下

传质效率仍然较低（图4a, d）。SC骨架的涡流分布不均匀，导致吸附剂利用率低。

- **仿生空心圆柱（BC）骨架**: BC骨架在腔体内形成均匀分布的小尺度涡流（ $K_m=85\ \mu\text{m}$ ），70%的吸附区域具有较小的 θ_s （ $<45^\circ$ ），从而在层流到湍流的广泛范围内实现了高效的传质（图4a, d）。BC骨架通过其独特的螺旋脊和棋盘格结构，显著提高了吸附剂的利用率和油类捕集效率。
- **其他空心骨架的不足**: 缺乏棋盘格结构的骨架（GC和HC）在所有雷诺数下均未观察到明显的涡流和小 θ_s 区域，表明棋盘格结构对涡流形成和物理场协同效应的重要性（图4a, d）。这些骨架的传质效率显著低于BC骨架。

4. 阻力减少的机制

- **速度波动与雷诺应力（ R_s ）**: 通过监测尾流区域（点A）的速度波动和雷诺应力，研究发现SC和SP骨架在三个方向上均表现出强烈的速度波动和高 R_s 值（-180至200 cm/s, 1.3–4.4 kPa）。相比之下，BC骨架在超临界流态下表现出几乎恒定的速度（接近0 cm/s）和极低的 R_s 值（0.002–0.04 kPa），表明其能够稳定流场并减少阻力和压降（图4e-g）。BC骨架的低 R_s 值和高稳定性使其在复杂水动力条件下表现出色。
- **其他骨架的表现**: 缺乏棋盘格结构的GC骨架在三个方向上均表现出不稳定的尾流（速度波动-120至180 cm/s, R_s 值1.3–1.9 kPa）。仅具有棋盘格结构但缺乏螺旋脊的CC骨架仅在垂直方向上稳定，水平方向上的速度波动和 R_s 值仍然较高（-100至100 cm/s, 0.06–0.7 kPa）（图4e-g）。这些骨架的流体动力学表现显著劣于BC骨架。

5. 流场模式与能量耗散

- **流线反转与涡流生成**: 通过对比不同骨架的流场模式，研究发现棋盘格结构在2D平面内通过多角度支柱诱导水流反转，生成大量涡流。然而，CC骨架的后半部分缺乏流线反转，导致涡流分布不足（图4h）。流线反转是生成涡流的关键机制，能够显著提高传质效率。
- **螺旋脊的作用**: 螺旋脊通过引导流线在3D空间内碰撞、偏转、汇聚和分离，重新启动了缺失的流线反转，并在腔体内广泛生成低速小尺度涡流（ $K_m=85\ \mu\text{m}$ ）（图4i）。螺旋脊的引入显著改善了流场的均匀性和稳定性。
- **能量耗散率（EDR）**: BC骨架将湍流的动能转化为旋转能，腔体内的EDR为20–70 W/kg，下游静止区域的EDR衰减至0–5 W/kg。相比之下，实心骨架和简单网格结构（GC和HC）的高EDR区域位于尾流中（25–90 W/kg），导致流体动力学稳定性和传质效率的显著下降（图4j）。BC骨架的能量耗散机制显著优于其他骨架结构。

6. 仿生设计的综合优势

- **棋盘格与螺旋脊的协同作用**: 棋盘格结构在2D平面内生成涡流，而螺旋脊在3D空间内重构流速、涡流尺度和分布，共同实现了水流能量的耗散和再分配。这种协同作用显著提高了油类捕集效率和流体动力学稳定性。
- **物理场协同效应的解释**: 物理场协同效应为涡流锚定流场增强传质和滤食效率提供了最可能的解释，与深海玻璃海绵的流体动力学稳定性机制一致。BC骨架通过优化流场模式和能量耗散机制，实现了高效的油类捕集和环境修复。

结果部分解读：湍流条件下的油类清除性能与应用潜力

1. 实验设计与目标

- 实验目标:** 研究团队通过实验验证仿生涡流锚固过滤器 (VAF) 在湍流条件下对浮油、水下油和乳化油的高效捕集性能，并与传统拦截技术（如实心圆柱SC骨架）进行对比。
- 实验条件:** 实验在雷诺数 (Re) 从 10^2 到 10^5 的范围内进行，测试了不同粘度 (Si20和Si100硅油) 的油类捕集效率 (Ce)。

2. VAF与传统技术的捕集效率对比

- 传统技术的局限性:** 实心圆柱 (SC) 骨架在捕集浮油、水下油和乳化油时表现出明显的吸附延迟和油滴逃逸现象。即使在层流条件下 ($Re=10^2$)，SC骨架对浮油、水下油和乳化油的捕集效率分别仅为50%、40%和7%。在强湍流条件下 ($Re=10^5$)，这些值进一步下降至7%、5%和1% (图5b-d)。
- VAF的卓越性能:** VAF通过腔体内生成的低速小尺度涡流，成功捕集并锚定油类，防止二次泄漏。VAF对所有类型油类的捕集效率均超过97%，即使在超临界流态下 ($Re=10^4$ 和 10^5) 也表现出色 (图5b-d)。此外，VAF的吸附剂利用率接近100%，显著提高了传质效率和停留时间 (图5f)。

3. 高粘度原油的捕集

- 挑战与解决方案:** 对于粘度高达1200 mPa·s的原油，VAF在室温下的捕集效率低于10%，原因是高粘度原油堵塞了孔隙。然而，通过将原油加热至65°C并搅拌分散成小滴，VAF的捕集效率可提高至80% (补充图21)。这表明VAF在实际应用中可能需要与光热或电热模块结合，以应对高粘度原油的捕集需求。

4. VAF的实际应用场景

- 移动车辆集成:** VAF可集成到船只等移动车辆中，实现浮油、水下油和乳化油的实时分散定点清除 (图5g)。
- 浮标配重:** VAF可作为浮标的配重，用于快速响应突发油污事故的及时清理 (图5h)。
- 垂直屏障:** 凭借其卓越的流体动力学鲁棒性和渗透性，VAF可通过互联方式构建长期垂直屏障，从源头上防止油污扩散 (图5i)。

5. 规模化与生命周期管理

- 规模化策略:** VAF的规模化可通过两种方式实现：（1）基于相似性准则（如雷诺数Re、欧拉数Eu、韦伯数We和舍伍德数Sh）的相似性原理；（2）通过增加VAF模块数量实现可扩展阵列 (补充文本5)。
- 生命周期管理:** VAF采用模块化设计，使用后的柔性吸附剂可回收，刚性骨架可通过更换新吸附剂重复使用。吸附的油类和鞭毛吸附剂可通过燃烧、回收或填埋等方式集中处理。循环测试验证了

吸附剂材料和油类的可回收性（补充图23）。

6. VAF的综合优势

- 技术优势:** 与商业围油栏、撇油器和化学方法相比，VAF在湍流条件下表现出显著优势，包括原位动态清除、高鲁棒性、易操作性、环境兼容性和生命周期可持续性。
- 科学意义:** 这项研究为开发基于生物物理启发的全方位油污清除策略提供了重要见解，展示了仿生设计在环境工程中的巨大潜力。

讨论部分解读：仿生设计的科学意义与应用前景

1. 仿生设计的核心思想

- 灵感来源:** 研究团队从深海玻璃海绵（*E. aspergillum*）的骨骼结构和滤食模式中获取灵感，开发了一种仿生涡流锚固过滤器（Vortex-anchored filter, VAF）。这种设计通过模仿自然界中经过长期进化优化的结构，实现了在复杂水动力条件下的高效油类捕集。
- 涡流锚定机制:** VAF通过将外部湍流动能转化为内部小尺度低速涡流，显著增强了界面传质效率，超越了传统技术中仅通过增加停留时间来提高捕集效率的方法。

2. VAF的技术优势

- 高效捕集性能:** VAF在亚临界、临界和超临界流态下均表现出卓越的油类捕集性能，对浮油、乳化油和溶解油的捕集效率超过97%，即使在强湍流条件下（ $Re=10^5$ ）也能保持高效捕集。
- 流体动力学稳定性:** VAF通过减少尾流中的雷诺应力（Reynolds stresses），显著提高了流体动力学稳定性，使其在复杂水动力条件下表现出优异的鲁棒性。

3. 跨学科研究的科学意义

- 多学科交叉:** 这项研究结合了环境工程、流体力学、生物物理学和仿生学等多个学科，不仅强调了流体动力学在油类捕集中的重要性，还为开发基于生物物理启发的原位、动态和鲁棒油污清除策略提供了新的思路。
- 范式转变:** VAF的设计代表了一种范式转变，展示了仿生设计在解决复杂环境问题中的巨大潜力。

4. 应用前景与扩展

- 环境修复与资源回收:** VAF的成功应用为环境修复和资源回收提供了创新解决方案。未来，VAF可以与光热、电热和电化学模块结合，开发出更适用、更经济、更可持续的先进系统。
- 广泛适用性:** VAF的设计理念可以扩展到其他领域，例如：
 - 光热模块:** 通过光热效应提高高粘度原油的流动性，增强捕集效率。
 - 电热模块:** 利用电热效应在低温环境下维持油类的流动性。

- **电化学模块:** 结合电化学技术实现油类污染物的降解和资源回收。

5. 实际应用中的潜力

- **复杂水动力条件:** VAF在实际相关的水动力条件下表现出广泛的适用性，能够应对从河流到海洋等多种环境中的油类污染问题。
- **模块化与可扩展性:** VAF的模块化设计使其易于扩展和集成到现有系统中，例如移动车辆、浮标和垂直屏障等。

6. 未来研究方向

- **性能优化:** 进一步优化VAF的几何结构、材料选择和操作参数，以提高其在不同环境条件下的捕集效率和稳定性。
- **多技术集成:** 探索VAF与其他先进技术（如光热、电热和电化学技术）的集成，开发多功能、高效率的环境修复系统。
- **生命周期评估:** 对VAF的整个生命周期进行评估，包括制造、使用和回收阶段，以确保其环境友好性和经济可持续性。