**仿生涡流：为污染水体打造深海级净化方案**

**从深海到生活：涡流净化技术的创新之路**

1. **泄露污染案例**

（一）大连输油管道爆炸事故（2010年）

2010年7月16日18时左右，大连市金州区大连新港附近发生了中石油一条输油管道的爆炸事故。事故发生时，正值夏季，大连新港海域的石油输送管道发生剧烈爆炸，一个10万立方米油罐爆裂起火。导致1500吨[原油](https://baike.baidu.com/item/%E5%8E%9F%E6%B2%B9/0?fromModule=lemma_inlink" \t "_blank)泄露,曾经碧波荡漾的大连湾油污遍布。事故发生后，约2000多名消防官兵紧急赶赴现场展开扑救工作，历经数十小时的奋力扑救，火势才得以基本扑灭。

泄漏物质与泄漏范围： 该事故导致大量原油泄漏，污染范围约为50平方公里的海域。这一广泛的海洋污染不仅破坏了当地的生态环境，还对周边的渔业生产、旅游业等经济活动造成了严重影响。污染的海水迅速扩散，油污覆盖了海面，形成了油膜，危害了海洋生物的生存环境。

污染程度与影响：

1. 海洋生态影响： 海洋生态系统的受损表现为海鸟、鱼类、贝类等生物的栖息环境受到破坏。尤其是渔业资源的严重下降，影响了沿海渔民的生计。
2. 空气与水质污染： 爆炸发生后产生的烟雾不仅对空气质量造成了负面影响，还加剧了海水中有毒有害物质的积累，进一步影响了水体质量。
3. 经济损失： 除了直接的生态损失，该事故对大连附近的渔业、旅游业以及船运造成了长时间的影响，经济损失惨重。

清理与修复难度： 大连输油管道爆炸事故的清理工作历时数月，清理过程中，主要采用了围油栏、吸油设备、人工清理等传统手段，但由于事故发生在海面，油污流动性较强，且受风浪等自然因素的影响，清理工作难度极大。尤其是当海浪较大时，围油栏的效果大大降低，且油污很难被完全回收。此外，部分原油渗入海床深处，导致部分污染无法通过常规手段清除，修复工作长期受阻。

（二）2011年渤海蓬莱油田溢油事故

2011年6月，位于渤海湾的蓬莱19-3油田发生了大规模的海底油井溢油事故。这一事件成为中国内地第一起大规模的海底油井溢油事故，造成了持续且严重的海洋污染。根据中海油与美国康菲公司的联合调查数据，事故发生后，大约700桶原油通过油井泄漏至海面，此外，还有约2,500桶矿物油基泥浆渗漏并沉积到海床。该事故对渤海海域造成了广泛而深刻的污染，涉及的污染面积高达5,500平方公里，约占渤海面积的7%。

泄漏物质与泄漏范围： 此次溢油事故的主要泄漏物质为原油和矿物油泥浆。泄漏面积达5,500平方公里的海域，对周边海域的水质和生物多样性造成了极大的威胁。受污染的海域不仅影响到渤海的生态平衡，还导致了大量的海洋生物死亡，特别是底栖生物和浮游生物遭到严重破坏。

污染程度与影响：

1. 生态影响： 渤海作为中国北方重要的渔业水域之一，事故导致的污染使大量海洋生物的栖息地遭到破坏。事故发生后，渔民报告称鱼类、贝类等经济性海洋生物的数量显著减少，影响了渔业资源的可持续发展。海鸟等水鸟也因原油污染而遭受生存威胁。
2. 水质污染： 由于油基泥浆和原油的污染，渤海的水质受到了显著影响，水体中的溶解氧含量急剧下降，导致水生生物死亡，部分海域的水质污染难以恢复。
3. 空气污染： 由于溢油事故发生时伴随着大量油烟和气体释放，这些有毒气体对大气环境和周边居民的健康构成了隐性威胁。

清理与修复难度： 此次渤海蓬莱油田的溢油事故清理工作面临着极高的技术难度。首先，事故发生在海底，清理原油和油基泥浆的工作非常复杂，需要依靠深海油井回收技术，而这种技术尚处于发展阶段。其次，渤海的水深较浅、海流复杂，导致污染的扩散速度较快，油污快速扩散到周围海域，造成了难以控制的局面。

清理工作主要通过使用围油栏、海上撇油器、油污收集船等设备进行，但由于海洋的动态变化和油污的粘度较大，传统的物理清理手段并不完全有效。特别是油基泥浆沉积到海床深处后，难以通过常规手段清除，必须采用更为先进的深海处理技术，这无疑增加了清理的难度和成本。

污染后果与修复进展： 事故发生后，国家海洋局和相关部门立即启动了大规模的生态调查和修复工作，经过数月的努力，初步恢复了部分水质，但整个生态系统的修复仍需要漫长的时间。此次事故的后果不仅影响了渤海的海洋生态系统，还对当地渔业、旅游业及相关经济活动带来了持久性影响。

以上两起事故充分说明了海洋石油泄漏事故对海洋环境造成的严重影响。在实际处理过程中，传统的污染清理方法如围油栏、吸油器、燃烧法等尽管有一定效果，但在海上复杂的动态环境下，这些方法面临着极高的技术挑战和清理难度。海洋石油泄漏不仅对生态环境造成了长期的影响，还使得经济损失不可估量。为了有效应对这类事件，亟需发展更为高效、环保的清理技术，尤其是针对海底油田泄漏、海水污染及生态恢复等方面的创新技术，以提高事故处理的及时性和有效性。

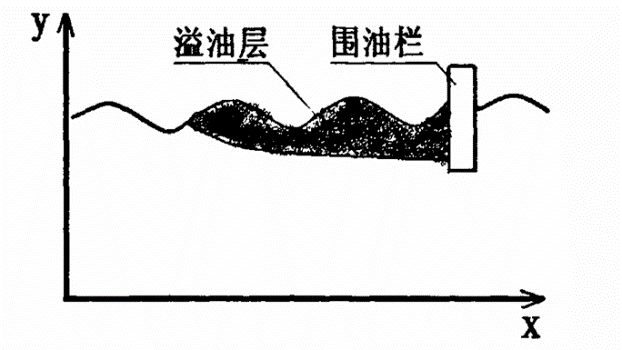
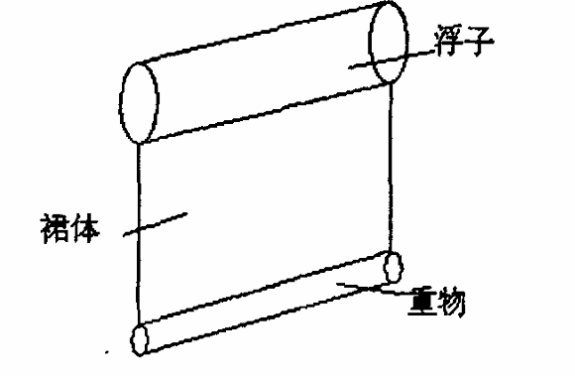
1. **原油泄露处理办法整合**
   1. **物理法**

物理法的核心目的是通过物理手段去除原油和水体中的污染物。

常见的方法包括：

1. 围油法：在漏油事件前期效果比较好，人们会用泡沫塑料隔绝燃油，防止扩散，再用撇乳器吸取，将其泵入一个回收罐，上岸后在对原油进行处理。但该方法只在海浪很小的时候效果较好。

在激流型河流中，常规的围油栏在激流冲击下极易发生结构失效，造成溢油携带逃逸。尽管可以通过改良裙体结构等方式减小围油栏所受阻力，但同时也可能减少溢油有效拦截面积，降低拦油效率。另外，在河流中布放围油栏是一项技术性和劳动强度较高的工作。



a b

图1.a)围油栏的一般结构;b)围油栏的围油机理

2. 吸附材料法：

吸油材料——对于较小范围的泄漏石油的海面，抛撒吸油材料是一种有效的方法．但对于大规模的石油泄漏事故它无能为力或只能作为一种辅助手段使用。

活性碳吸附过滤——当处理低含量含油污水时可使用这种方法，但它的应用范围有限。当活性碳吸附达到饱和后还必须进行脱附处理才可以再次加以利用。

3. 机械回收法：利用各种机械设备直接回收海面上的原油。下面列举各种类型机械，介绍如下：

* 堰式收油机：堰式收油机是最常用的收油机之一，它借助重力使油从水面流入集油器并将油泵入储油容器。适用于在波高小于0.3米的平静水域回收中、低粘度的溢油。
  + 优点：尺寸小、结构简单、维护方便、适用范围广。
  + 缺点：主要适用于平静水域，对高粘度溢油效果有限。
* 带式收油机：利用转动的亲油吸附带吸附水面溢油，通过刮片或辊轮将吸附的溢油收入集油器内。
  + 优点：回收速率高、效率高、适应区域广、随波性好。
  + 缺点：结构复杂、体积大、需配合起吊设备、造价高。
* 动态斜面式收油机
  + 优点：适用于不同厚度油层，受漂浮垃圾影响小，回收效率高。
* 转盘式收油机：由液压动力站、撇油头（主机）以及液压油管、输油管等组成，适用于各种粘度的溢油回收
  + 优点：适用于各种粘度溢油，适用环境广泛（海洋、河流等）。
  + 缺点：对高粘度或特殊油品回收效果有限，受环境因素影响大，维护成本高。
* 真空式收油机：由收油主机（缓冲罐、吸油头）和动力站两部分组成，适用于沙滩、滩岸、礁石等场合，也可用于港湾、油港、码头等水域‌。
  + 优点：适用于复杂地形（沙滩、礁石等），设备占地面积小。
  + 缺点：设备成本高，需定期维护和更换滤芯，操作要求高。
* 绳式收油机：由动力站、挤压机、液压油管、输油管和粘附溢油的收油绳组成
  + 优点：适用于恶劣条件下不同粘度溢油的回收。

4. 其他物理方法

重力分离：利用油水密度差，通过静止或流动状态下实现油水分离。

离心分离：通过高速旋转形成离心力场，使油珠与水分离。

粗粒化：利用疏水亲油材料促进油珠聚结成较大油滴。

过滤：通过滤层截留水中的油分和悬浮物。

膜分离：利用膜的选择透过性分离油水混合物。

* 1. **化学法**

化学法主要通过添加化学物质来打破油水之间的界面张力，从而使油水分离或油污凝固。这类方法通常需要对水质有较高要求，且对环境影响较大。

常见的方法包括：

1. 燃烧法：简单易行，燃烧掉的只是原油中的一小部分可燃物，其它不可燃物还将继续留在海中与海里的其它物质结合成稠状物。而且，使用此方法处理后，海水中将会留下更难处理的石油残渣，燃烧生成的气体会造成大气污染。

2. 化学试剂法：

**以分散剂为例**——是海上漏油事故中用得最多的一种方法，其原理是降低油/水的见面张力，借助海浪的力量，在海水波动与湍流的作用下，将成片的漏油分散成小颗粒，稀释于整个水体中。

**以胶凝剂为例**——利用石油产品遇到某些化学药剂会发生胶凝作用而固化的机理，再将凝固后的石油机械收集的方法。但该方法对海水温度、流态以及油类性质有较高要求。

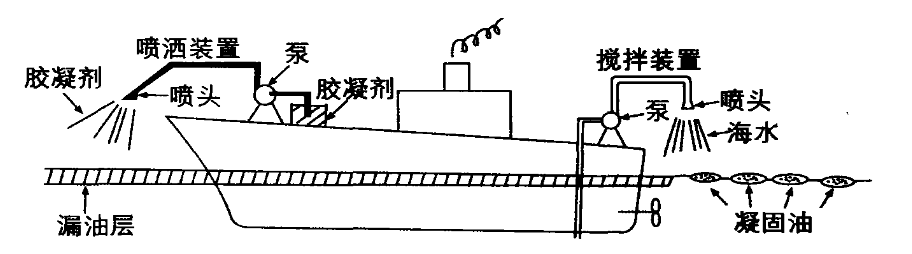


图2.海上喷洒凝固剂的操作示意图

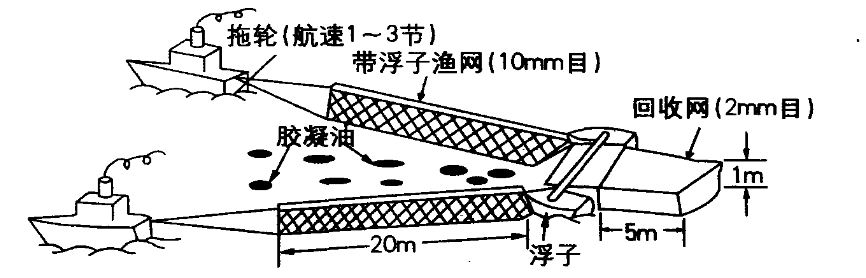


图3.渔轮拖网清除凝固石油污染示意图

3.化学氧化法：将污水中呈溶解态的无机物和有机物转化为微毒、无毒物质或转化成容易与水分离的形态。又可分为氧化剂氧化法、电解氧化法和光化学催化氧化法——

氧化剂氧化：利用强氧化剂氧化分解污水中的油和 COD 等污染物质以达到净化含油污水的一种方法。

电解氧化法：在污水中插入电极并通过直流电, 使污水中的油和 COD 等污染物质在阳极发生电氧化作用或与电解所产生的氧化性物质发生作用以达到净化含油污水的一种方法。

光化学催化氧化法：采用半导体材料利用太阳光能或人造光能以达到净化含油污水的一种方法。

优点：有效降解有机污染物，减少环境负担。

缺点：操作复杂，需控制反应条件，对设备要求高。

* 1. **物理化学法**

物理化学方法结合物理与化学手段，提高油水分离或降解效率，适应性强、选择性广。

常见的方法包括：

1. 气浮法：依靠气泡表面吸附油粒或悬浮物以达到分离的目的, 在含油污水中通入空气或其他气体产生微细 气泡, 使水中的一些细小悬浮油珠及固体颗粒附 着在气泡上, 形成水 - 气 - 油粒三相混合体系, 随气泡一起上浮到水面形成浮渣, 然后使用适当 的撇油器将油撇去。

**优点**：处理效率高，适用范围广。

2. 吸附法：利用吸附剂的多孔性和大的比表面积, 将含油污水中的溶解油 和其他溶解性有机物吸附在表面从而实现分离。

**优点**：提高油水分离效果，作为辅助手段使用。

3. 超声波分离法：当超声波通过含油污水时, 会使微小油滴与水一起振动, 而由于大小不同的粒子 具有不同的相对振动速度, 油滴将会相互碰撞、黏合, 使其体积增大, 随后变大的粒子不能随声波振动, 只作无规则运动, 最后水中的油滴凝聚并上浮, 再用其他设备分离 。

**优点**：提高油滴上浮速率，增强分离效果。

4. 电化学法：通过电解过程实现油水分离或油的氧化降解。包括电凝聚、电气浮和电火花法——

电凝聚是利用溶解性 电极电解含油污水, 从溶解性阳极溶解出金属离子, 金属离子水解生成氢氧化物, 它能吸附和凝聚乳化油与溶解油, 沉淀后除去油。

电气浮是利 用不溶性电极电解采油污水, 在电解分解作用和 初生态的微小气泡上浮作用下, 使乳化油破坏, 并使油珠附着在气泡上。

电火花法是利用交流 电来去除采油污水中的乳化油和溶解油, 在电场作用下筒内的导电颗粒间会产生电火花, 在电火花和水中均匀分布的氧的作用下, 油分被氧化和 燃烧分解 。

优点：处理效果好，占地面积小。

缺点： 电凝聚：需要消耗金属离子，生成污泥

电气浮：需要大量电能，设备维护成本高。

电火花法：设备复杂，操作要求高，能耗大。

* 1. **生物化学法**

生物化学法通过利用微生物分解油污，或通过化学反应促进油污降解。它具有较高的环境友好性和可持续性。

常见的方法包括：

1． 生物修复技术：接种高效降解菌，利用微生物分解石油烃。**好氧生物处理**：需氧环境下微生物降解。**厌氧生物处理**：缺氧环境下微生物降解。过程形式可以考虑**污泥法、生物过滤法、氧化塘法。**

 污泥法：利用微生物培养在污泥中降解油污。

 生物过滤法：通过过滤介质中的微生物降解油污。

 氧化塘法：利用人工或自然湿地中的微生物降解油污。

**优点**：环境友好，能有效降解复杂有机物。

**缺点**：降解速度较慢，受环境条件（如温度、pH、营养物质）影响大，处理效率可能较低。

尽管在开发和改进这些技术方面取得了进展，但它们仍然存在许多缺点，包括结构失效、成本高、分离效率低、操作缓慢、回收油/水纯度差、诱导污染和毒性以及不可生物降解等。它们的有效性和适用性紧紧取决于其他因素，包括泄漏油的粘度、天气条件、周围环境、泄漏地点的可及性等。而且这些技术面临的一个共同挑战是它们对水流波动的敏感性。由于石油捕获基质的不均匀、不稳定和不可控的流体动力学行为，这将导致机械稳健性、界面传质和捕油效率方面的严重性能损失。在管道泄漏和海上工业排放的情况下，水包油乳液通常会遇到此类问题。因此，需要研究有效的解决方案，以便在复杂的流体动力学条件下对泄漏的石油进行动态稳健的清理。

**三、维纳斯花篮**

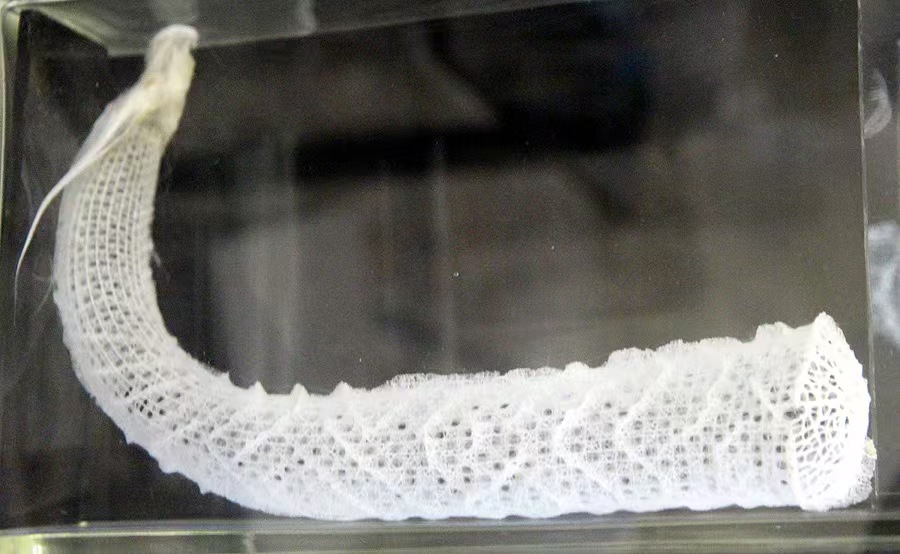
深海玻璃海绵E.aspergillum（也称为维纳斯花篮）属于Porifera门中记录的最古老的海绵类（Hexactinellida）：它居住在海底，尤其是太平洋和南极洲周围，深度为100-1,000m，没有环境阳光。机体底部锚定在海底的软沉积物上，并突出到底栖边界层流中。

图4.维纳斯花篮

与可以获得高营养光合藻类的浅水海绵相比，深海海绵主要以悬浮在水柱中的低浓度非光合细菌为食。在深海海绵的栖息地，摄食尤其具有挑战性，那里的强流有利于粘土和碎屑（占悬浮颗粒的97%以上）的存在。E.aspergillum通过其体腔内的低速涡流结构实现了高效、选择性的滤食，这在图1中得到了证明。图1c中这些复杂的漩涡图案有利于悬浮颗粒在整个海绵的鞭毛室中的分布，营养物质在这里被吸收，无机颗粒被丢弃。同样，E.aspergillum的繁殖可能会通过体腔内的漩涡结构得到增强。该生物进行有性繁殖时，其中自由生成的精子使保留的卵受精：涡状结构可能有利于体腔内配子之间的相遇。

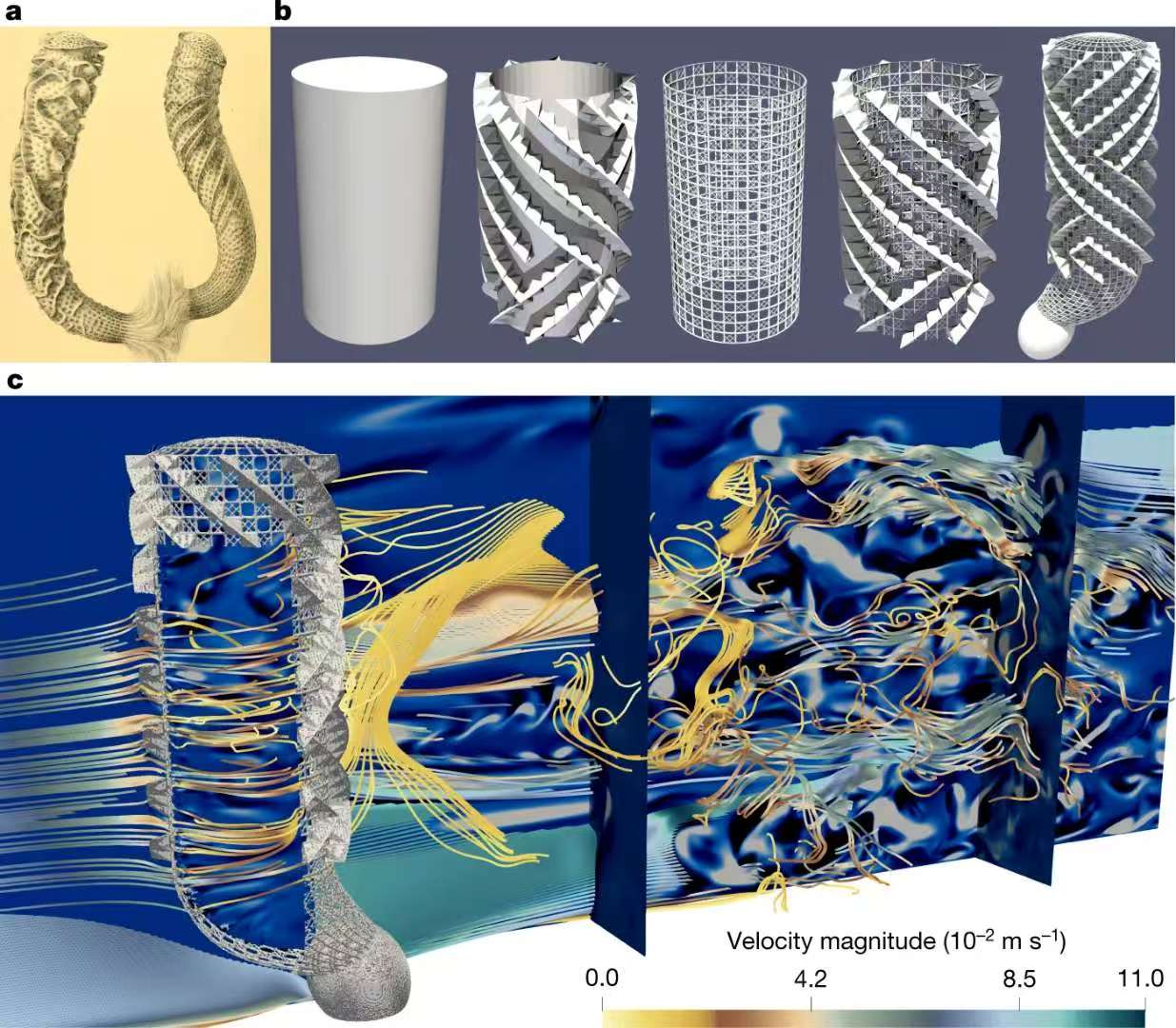


图5

**a**.深海玻璃海绵E.aspergillum

**b**.显示了向E.aspergillum结构增加复杂性的几何进展。从左到右：实体模型S1（普通圆柱体）、实体模型S2（带螺旋脊的圆柱体）、多孔模型P1（空心圆柱晶格）、多孔模型P2（带螺旋脊的空心圆柱晶格）和E.aspergillum的完整模型。

**c**.模拟显示E.aspergillum在Re=2,000时浸入流体动力学流中的完整模型。该面板显示了流体的螺旋度和条纹线的轮廓，根据流速大小着色（右下角的色标）。极端模拟捕捉了海底边界层的形成及其与E.aspergillum骨骼基序的相互作用。海绵内的低速涡流结构可以说有利于选择性滤食和有性繁殖的配子相遇。近乎静止的区域延伸到海绵的下游，缓和了生物体所经历的流体动力学载荷，如下游螺旋度场的两个垂直横截面所强调的那样。

具体来说，E.aspergillum具有多层骨骼-鞭毛结构，当水流流经E.aspergillum的海绵体时，多角度支柱会形成3D流线，频繁碰撞、偏转、会聚和分离。然后，宏观尺度湍流消散，导致体腔内在亚临界和临界状态下出现小规模的低速涡流Re＜5000。漩涡流型是减少流体动力学负荷、通过鞭毛捕获营养物质和保持机械稳定性的关键。这使得E.aspergillum能够在太平洋和南极洲周围100至1000米的深度通过亿万年的自然选择茁壮成长。

深海玻璃海绵骨架结构的作用

• 降低流体动力应力：深海玻璃海绵的骨架由高度规则和分层的圆柱形晶格组成，这种结构能够有效降低整体流体动力应力。这种特性使得海绵能够在湍流环境中保持稳定，减少因流体冲击而导致的损伤。

• 支持内部再循环模式：在低流速条件下，玻璃海绵的骨架结构支持连贯的内部再循环模式。这种再循环模式有助于海绵进行选择性滤食和有性生殖，同时也为其他生物提供了栖息地和营养物质的交换场所。

**参考文献——包括且不限于：**

[1]张薇娜.海上泄漏石油的清理技术[J].洗净技术,2003(09M):31-34.

[2]魏芳. 围油栏在多种海况下拦油效果及形状优化的数值模拟[D]. 辽宁:大连海事大学,2007. DOI:10.7666/d.Y1037141.

[3]Schrope,M.Oilspill:Deepwounds.Nature472,152–154(2011).

[4]Abidli,A.,Huang,Y.,Cherukupally,P.,Bilton,A.M.&Park,C.B.Novelseparatorskimmerforoilspillcleanupandoilywastewatertreatment:Fromconceptualsystemdesigntothefirstpilot-scaleprototypedevelopment.Environ.Technol.Innov.18,100598(2020).  
[5]Pu Li, Qinhong Cai, Weiyun Lin, Bing Chen, Baiyu Zhang.Offshore oil spill response practices and emerging challenges.

[6]Al-Majed A.A., Adebayo A.R., Hossain M.E.A sustainable approach to controlling oil spills.

[7]Falcucci,G.,Amati,G.,Fanelli,P.etal.Extremeflowsimulationsrevealskeletaladaptationsofdeep-seasponges.Nature595,537–541(2021).

[8]Yu,Y.,Ding,C.,Zhang,J.etal.Afilterinspiredbydeep-seaglassspongesforoilcleanupunderturbulentflow.NatCommun16,209(2025).

[9]Aizenberg,J.etal.SkeletonofEuplectellasp.:structuralhierarchyfromthenanoscaletothemacroscale.Science309,275–278(2005).