

微观世界里的可燃冰

□ 文图 / 李承峰 孙建业 刘昌岭

第一作者简介 李承峰，青岛海洋地质研究所“国家国土资源科普基地”和“全国海洋科普教育基地”青年科普志愿者，自然资源部天然气水合物重点实验室科研人员，主要从事天然气水合物微观探测与实验模拟研究。

可燃冰学名是天然气水合物，之所以被叫做“可燃冰”，一方面是因为其含水且呈固体，肉眼看来，其外观与冰无异；另一方面，它在常温常压下极不稳定，遇火容易被点燃。它是一种晶体物质，由一个个不同的笼状结构组成，这些笼状结构是由若干个水分子按照一定的规律组合起来的，模样像大小不一的足球，并且在每一个笼子里“关”着一个气体分子。

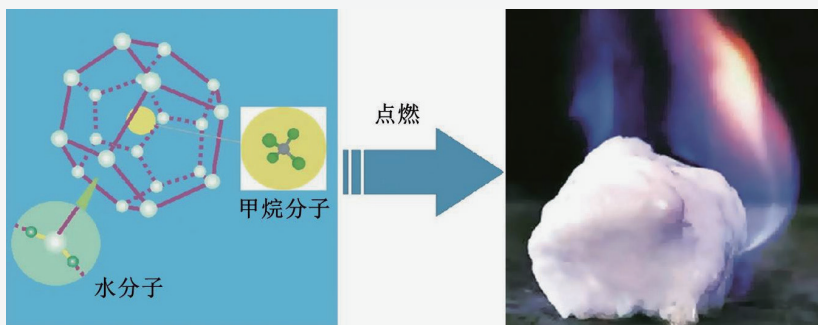
最初，可燃冰是作为一种容易堵塞油气输送管道的麻烦制造者被对待的。20世纪70年代以来，人们逐渐在海底和陆地冻土区发现了可燃冰，并且蕴藏量十分丰富。据科学家估计，海底可燃冰的分布范围约占海洋总面积的10%，全球可燃冰的储量相当于当前已探明化石燃料（煤、石油和天然气）总含碳量的两倍。于是，可燃冰“摇身一变”，作为一种极具潜力的未来能源而引起人们的广泛关注。当今，世界各



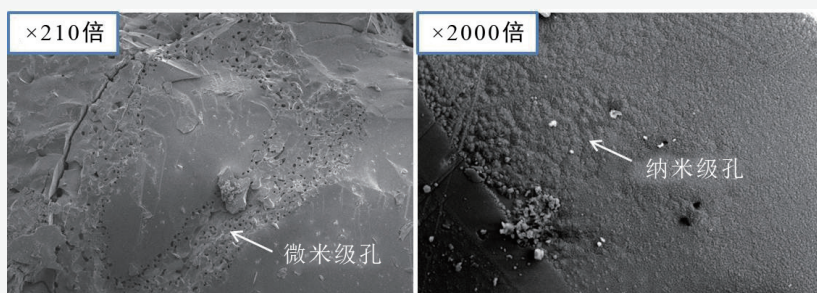
＞ 野外钻获的可燃冰实物样品

主要海洋或极地国家都在开展可燃冰研究，并已获得许多可燃冰实物样品。自然界中的可燃冰产状各异，其成因主要有两种类型：一是由气体渗透到地层孔洞或裂缝中形成可燃冰，呈块状、脉状或结核状；另一种是气体扩散到沉积物孔隙中形成可燃冰，通常肉眼难以识别。

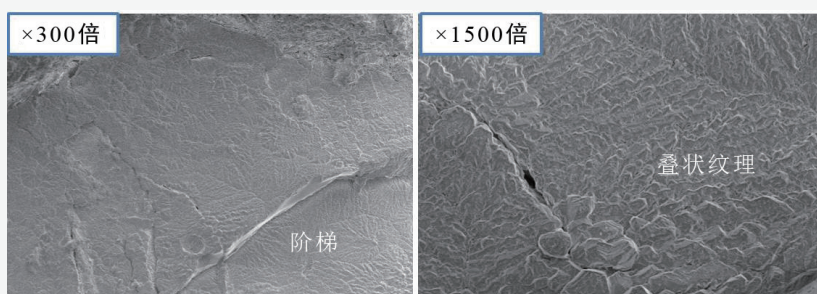
正如相貌平平的岩石在显微镜下可以呈现出多姿多彩的绮丽造型，外表普通的可燃冰，在微观世界里又会呈现出一番怎样的姿态呢？



＞ 可燃冰的笼型结构



> I型结构可燃冰表面形貌



> II型结构可燃冰表面形貌

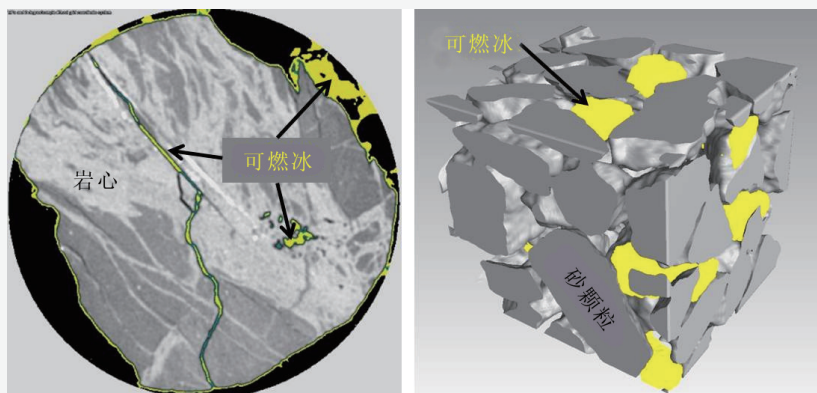
揭示可燃冰的神秘面容

要想保持可燃冰不分解，常温 20 摄氏度下需要约 237 个大气压，或者常压下需要低于零下 80 摄氏度的环境温度。鉴于这一严苛条件，要想给可燃冰在显微镜下拍个照片实非易事，需要特殊的仪器设备。随着在结构生物学领域大显身手的低温扫描电子显微镜（Cryo-SEM）

被引入到地学研究中来，可燃冰的神秘面纱被渐渐揭开，露出了其本来的、与冰完全不同的微观面容。

科学家发现，受可燃冰晶体中气体分子种类及扩散程度的影响，其表面形貌呈多样化特征，明显区别于显微镜下冰的细致光滑表面。自然界中最常见的是包含甲烷气体的可燃冰，属于 I 型结构，表面以多孔状为主要特征。表面微孔的大小存在不同，既有相对较大的微米级孔（30 ~ 40 微米），也有较小的纳米级孔（200 ~ 400 纳米）。这些孔的含量和分布特点，一方面反映了可燃冰在生长过程中气体分子的丰富程度，另一方面也表明可燃冰在自然界中长期处于生长—分解的动态平衡，内部时刻进行着气体和水的迁移。可燃冰分解时，在表面微孔的位置首先冒出气泡，这也间接证明了表面微孔实则是样品内部的物质传递通道。

含碳量更高的烷烃分子（如丙烷、丁烷等）与水形成的可燃冰，晶体属于 II 型结构，其表面常表现出叠状纹理或阶梯状，错落而有致，与上述 I 型结构类型的可燃冰呈现出迥异的表面形貌。



> 岩石裂缝与粗砂孔隙中富集的可燃冰

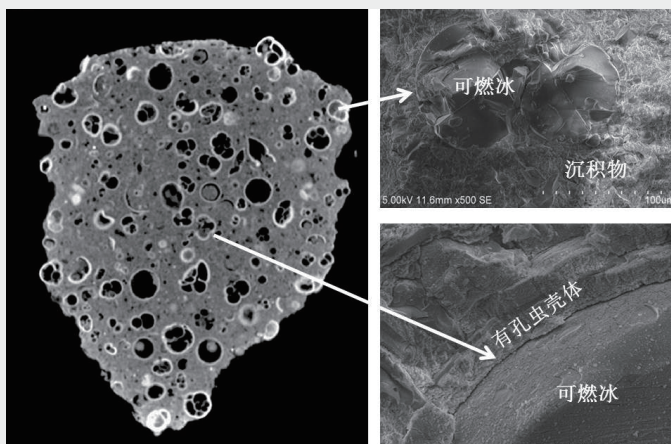
细探可燃冰的居住环境

可燃冰喜欢居住在通透的空间里，这是为了方便获得其生长所需要养料——天然气和水。自然界中，冻土区岩石和海洋沉积物中渗透性较好的裂缝或孔隙便成为可燃冰的理想居住场所。

而这些场所的细致布局是什么样的？可燃冰在其中又有怎样的分布规律？尤其对于肉眼看不见的分散型水合物，这些问题需从微观视角逐步深入探究。

科学家通过利用 X 射线计算机断层扫描技术（也就是人们常说的 CT 技术）对可燃冰样品进行观测，可在不破坏样品原始形态的前提下有效地获得其内部空间结构信息，相当于连可燃冰带其居住场所一起做了一次整体 CT 扫描。扫描的结果显示可燃冰更喜欢大空间，如沉积物内部的粗裂缝或粗砂颗粒的孔隙中最容易出现可燃冰的富集，因为相比致密的泥或粉砂区域，该处空间连通性更好，天然气和水的供应更加充足。

我国祁连山冻土区岩心样品中，主要在大于 300 微米以上的裂缝里发现有可燃冰的存在。我国南海神狐海域沉积物虽以粘土和粉砂含量为主，钻探取样发现沉积物中还含有丰富的有孔虫壳体。有孔虫是一类古老的原生动物，5 亿多年前就产生在海洋中，种



＞ 南海沉积物中可燃冰在有孔虫壳体中分布的 CT 和 SEM 扫描图

类繁多，其能够分泌钙质或硅质形成一到多个房室，房室之间相互连通，而且壳上有一个口孔和多个细孔，这就给周围沉积物中的天然气和水提供了一个理想的流通和储集空间，在合适的温度和压力条件下，可燃冰优先在壳体中生长。

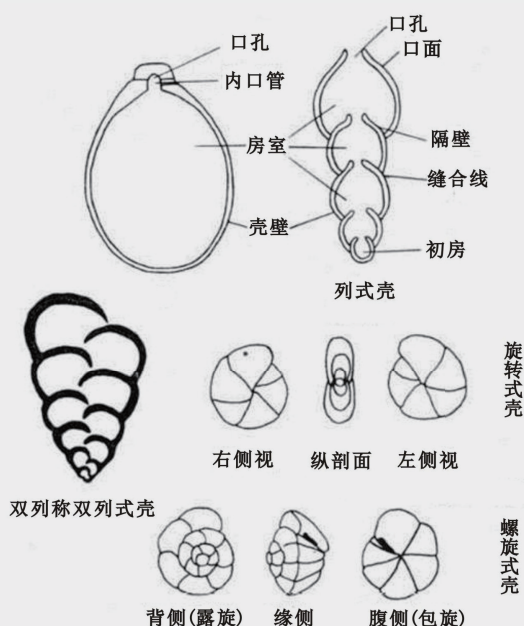
结语

我国南海可燃冰试采取得的巨大成功，使人们看到了开发利用可燃冰的美好前景。然而，目前对可燃冰的基础认识仍不完善、开发理论和技术仍不成熟，可燃冰的微观活动机制成为其中一个关键的制约因素，对可燃冰的成核微观过程、可燃冰与沉积骨架的接触关系、泥质粉砂质沉积物孔隙和喉道拓扑结构等更加精细的表征，仍然受限于分析仪器的分辨率而无法准确获得。

尽管可燃冰开采的道路依然充满挑战，但是人类对于利用这一新型清洁能源的热情不可阻挡。我们相信随着科技水平的不断提高，会有更多更先进的技术被引入到可燃冰的研究中，届时可燃冰将不再神秘，它会像煤、石油、天然气等常规化石能源那样，走进日常生活，服务现代社会。

第一作者单位 / 中国地质调查局青岛海洋地质研究所

（本文编辑：张佳楠 胡 勇）



＞ 典型有孔虫壳体构造图