

卢海龙：深蓝下，捕捉可燃冰之火

本报记者 赵征南

深海有“火”，其名为“冰”。

“我还是更习惯叫它天然气水合物。”即便如此，我国天然气水合物试采现场指挥部首席科学家卢海龙也在逐渐接受“可燃冰”这个称谓，对于这种非常规能源的科普而言，后者更加形象。

天然气水合物，是我国第173个矿种，俗称可燃冰，是一种以甲烷为主的烃类气体分子和水分子在低温高压下形成的结晶物质，分解为气体后，甲烷含量一般在90%以上，最高可达99.9%，也被形象地称为天然气“压缩包”。

这是一种标准的“高潜力”能源：储量极为丰富，全球可燃冰

资源量预计为20余万亿吨油当量，是全球煤、石油和天然气中有机碳量总和的两倍；燃烧值高，1立方米的可燃冰分解后可释放出约0.8立方米的水和164立方米的天然气，能量密度高的同时又清洁，燃烧后的产物只有二氧化碳和水，不会释放出粉尘、硫化物、氮氧化物等环境污染物。

我国海域可燃冰的资源量，初步预测为800亿吨油当量。如何将它们找出、锁定并开采为人类发展所用，成为中国地质人延续20多年的梦想。

如今，在蓝色火焰照耀下，远方的美丽图景似乎越来越近了。

今年3月，自然资源部中国地质调查局组织实施的我国海域天然气水合物第二轮试采取得圆满成功：在水深1225米的南海神狐海域，创造了产气总量149.86万立方米、日均产气量3.57万立方米两项新的世界纪录，实现从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越，向产业化迈出了极为关键的一步。

回到未名湖畔，卢海龙不断总结，不断沉淀，对可燃冰产业化时间表也有了新的判断。相对原先“商业化开发需在2030年以后”的估计，他充满信心地说出了四个字，“已见曙光”。

他的信心，究竟源于何方？

从“钻台”走到“灶台” 地层流体抽取法拥抱可燃冰之梦

1995年，中国可燃冰的预研究正式启动。

那时的卢海龙，已经登上了个人研究可燃冰的“探索号”列车。北大毕业后，他进入中国地质科学院研究生部进行矿床地质学研究，后来又“阴差阳错”地邂逅“冰火之恋”。当时，很多人担心水合物领域过于前沿不敢研究，卢海龙因为选择它可省下一大笔学费，便和一辈子的知己可燃冰走到了一起。

去哪里找可燃冰？一般可以概括为6个字，上寒山、下深海。可是，卢海龙连乘船出海的“天赋”都没有。

首次考察，在茫茫大海间，卢海龙晕得只能靠喝糖水来补充体力，最强烈的感觉就是“不想干了”。历经一周的适应期后，他还是坚持了下来。出海，取样，实验，研究……在接下来的20年里，卢海龙在世界水合物领域留下了多个“第一次”——第一次发现多成分可燃冰成分分布的不均匀性；第一次确认了H型可燃冰在自然界的存在……

在他心无旁骛伏案科研之时，国内可燃冰开发也进入追赶阶段：1999年，我国开启天然气水合物资源调查，中国地质调查局广州海洋地质调查局在南海首次发现天然气水合物存在的地球物理标志——似海底反射(BSR)；2007年，在南海神狐海域实施天然气水合物首次钻探，钻获实物样品；2011年，启动天然气水合物资源勘查试采国家专项……一举动，都在卢海龙的心中留下印记。

2014年，我国可燃冰资源试采工程开启的消息传来，卢海龙刚好50岁。“我这一生，已经过去了大半，还想为国家多做点事情。”他婉拒多家海外企业的邀约，重回北大。

在中国地质调查局和北京大学的全力支持下，卢海龙组建了一支由地球化学、地质学、地球物理学、微生物学、力学、物理学、油气生产数值模拟等多个学科、多个方向的科研人员组成的可燃冰研究队伍。这支队伍立足于基础研究，为可燃冰开发技术研究提供水合物基础物性成果，同时开展可燃冰开发技术研究，为其商业性开发奠定基础。

其中，于世界范围内首次提出的“地层流体抽取法”试采原理是关键

中的关键。

为何这么说？这与工程的地质条件及目标方向密切相关。

2017年，我国海域天然气水合物第一轮试采在南海神狐海域启动，卢海龙成为首席科学家。当时，除中国外，美国、日本、印度、韩国和加拿大等国也在实施可燃冰开采研究项目，开发时优先将渗透率高、饱和度高的砂质储层作为开发对象，其孔隙条件、水合物饱和度等条件均较好，便于开采。而我国却选择泥质粉砂储层进行试采，砂质导致孔隙率低，渗透率差。

为什么试采要挑更难的“骨头”啃呢？“泥质粉砂储层是世界上分布最广泛的类型，资源量占全球的90%以上，是我国主要的储集类型。为产业化，我们必须这么选择。”卢海龙说。

也就是说，试采的可燃冰并非我们设想中成块的、白色的类固体酒精晶体，而是外表看起来黑黝黝，藏在砂层或泥质粉砂层孔隙中肉眼难以辨别的可燃冰。

要想把它们取出，主要有注热法、降压法、化学抑制剂法、二氧化碳置换法、固体开采法等开采方法。考虑科学性、经济性和可行性，我国采用了降压法。降压法必须要解决好开采过程中砂粒随流体从储层中运移出来，影响开采效率甚至堵塞管道的出砂问题。再加上泥质粉砂储层的限制，可谓难上加难。

为此，卢海龙团队在世界范围内首次提出了地层流体抽取法，并据此制定了试采新工艺——采取降压法，把海底原本稳定的压力降低，打破天然气水合物的成藏条件，使分散在孔隙里的天然气水合物分解；同时，使用地层流体抽取这套水、砂、气分离核心技术，在储层和井壁稳定允许的降压幅度下，通过储层改造等方式加大储层流体抽取量，从单纯的考虑降压变成了关注流体的抽取，有效解决储层流体控制与可燃冰稳定持续分解难题，达到了长期、高效、安全开采可燃冰的目的。

2017年5月10日，神狐海域可燃冰试采点火成功。截至7月9日主动关井，连续试气点火60天，累计产气量超过30万立方米，平均日产5000立方米以上，甲烷含量最高达99.5%。



试采现场的卢海龙。受访者供图 制图：邢千里

第二轮试采平台“蓝鲸2号”。

第一轮试采创两项世界纪录。

从垂直井到水平井 “豆腐上打铁”实现产量跨越

“试采前压力非常大，国家花那么多钱，万一达不到预期效果，拿什么向国家交代。”卢海龙深感责任重大。

随着南海神狐那团从平台伸向海面的火焰冲天而起，可燃冰首次试采取得了持续产气时间最长、气流稳定、环境安全等多项重大突破性成果。包括卢海龙在内，现场的多少梦想，多少期盼，在一瞬间变成了现实；在这背后，又是多少汗水、多少心血，多少个日夜的艰辛探索，有了回报。

卢海龙充分感受到中国在重大科技项目攻关中的体制优势：在党中央、国务院的领导下，我国可燃冰勘查开采上升为国家行动。自然资源部、财政部、国家发改委、科技部密切配合，强力推进我国海洋可燃冰资源勘查开采工作，中国地质调查局负责具体组织实施。在整个国家上下齐心下，我国可燃冰开采得以先至，拔得头筹。

根据计划，可燃冰的产业化之路分为理论研究和模拟试验、探索性试采、试验性试采、生产性试采和商业开采等五个阶段。第一轮试采成功完成了探索性试采，仅仅意味着可燃冰试采进入试验性试采的攻关阶段，距离实现产业化还很远。正如中共中央、国务院对我国海域天然气水合物第一轮

试采成功的贺电所说：“海域天然气水合物试采成功只是万里长征迈出的关键一步，后续任务依然艰巨繁重。”作为首席科学家，卢海龙要参与试采前的勘查、准备，指导天然气水合物基础物性和产能模拟研究；同时参与试采现场工作，根据试采现场结果，指导试采生产过程。

2017年夏天，在第一轮试采总结会上，科研人员之间初步达成共识：围绕第二轮试采要进一步提高产气量的目标，垂直井路线走不通，水平井是必由之路。卢海龙在会上直截了当地提出：“没有水平井技术突破，水合物产业化开发就没有可能……”

如今，对当时自己所说的这句话，卢海龙作了解释：“产业化开发一定要有有利可图，如果开采达不到一定的产规模，距离商业化开发的要求就还比较远。”

水平井路线可以实现井眼沿储层展布方向分布，穿越储层的长度更长，不仅提高了天然气水合物储层打开程度，而且增大了井筒暴露影响面积，从而在相同的井底压力下，气体进入井筒的通道增多，有效提高产气规模。

然而，水平井对技术、工艺和装备的要求更高，施工难度更大，尤其是在

深海浅软地层中实现水平井钻采，如同“豆腐上打铁”，面临井口稳定、井壁稳定、储层改造等一系列世界性难题，钻探风险极高。

试采团队首先在陆上试验基地完成了300米浅软泥质地层水平井并安全建井，但并不意味着在海域施工中能做到万无一失。

采访中，卢海龙少有豪言壮语，更多的是在平静中讲述着自己和团队的工作。他是个乐天派，如今在回忆3个多月前的场景时也是云淡风轻。

实际上，进驻工程现场的他怎会没有压力？随着钻杆一根又一根接起来钻向深海底部，挺进可燃冰储层，他内心逐渐随着试验数据的变化而跳动。最紧张的时候，他就把自己关在试采平台上的“小黑屋”里，思考着数据波动预示的每一种可能，为施工团队提供技术支持。

特别是第二轮试采吃劲时又遇到新冠肺炎疫情，团队经受着巨大的考验。卢海龙记得，有一段时间，专家聚在一起经常会释放出“冰冻”的气氛。但是，紧张的人多了，他反而稍微放松了。

“我对‘日xx方’这样的指标比较敏感，但并不怕试采出现技术问题。作为科学家，试采阶段很大程度上会期盼问题的发生，这样可以更早地发现问题，并提出针对性的解决方式，为日后的产业化铺路。”卢海龙如此解释自己的心绪变化，“基本上每个问题都有预案。最坏的情况，就是更换井位，我们每次都会设置备用井位。”

的天然气只可能向压力低的生产井流动，不会在地层中形成异常高压，从而不具有向海底逃逸的能量。一旦生产停止，地层压力将逐渐恢复，水合物分解停止。水合物分解停止后，地层中残余天然气将再次形成天然气水合物，不会发生从地层向海底的天然气大规模泄露，这样也就不会造成海洋环境和生态的破坏。”

从南海归来后，卢海龙大部分时间都出现在北京大学遥感楼。这里紧邻未名湖，绿植环绕，是卢海龙团队的模拟实验室所在地。两次试采获取了海量数据，对这些数据进行分析，将深入了解水合物开发过程中的各种现象，服务于今后的试采和产业化开发。

在实验室做科学家与在工程现场做科学家有什么不同？“两个角色我都喜欢。不同之处在于，实验室科学家天马行空的空间更大，可以允许实验失败；而工程科学家了解多少就要说多少，不能说太多，一切都要有充分的依据，因为没有推倒重来的机会。”卢海龙如此回答。

卢海龙认为，在关键技术的攻关中，应呼唤更多“工程科学家”的涌现，只有离工程更近，才有可能做出更有针对性的科研，创新也会更高效。

记者手记 深海破冰

只有经历过中国海域天然气水合物试采长征路的人，才会明白这条路走得有多么艰难！

卢海龙犹记得，少年时代，他便和地质结缘。他喜欢《地质之光》这部报告文学，崇拜李四光，崇拜地质前辈身上的执着、坚毅、踏实与创新。

2015年，在获得中国地质调查局首批“李四光学者”称号后，他说：“我们要继承李四光先生的开拓精神和科学精神，用创新性的成果，真正将天然气水合物作为一种能源，充分利用起来。”

如今，在可燃冰产业化的进程中，他亲眼见证了千万个传承“李四光精神”的地质人正结伴走来。他们用20多年的时间，实现了从追赶、并行到领跑的超越。这一切，都是在“无”成功先例、“无”成熟团队、“无”成熟平台、“无”成熟工艺的条件下实现的。

身处试采团队之中，卢海龙每天都能感受到一股坚韧向前、勇攀高峰的劲头，“越是空白，越是有人封锁，越是‘卡脖子’的关键技术，越是无比艰难的时刻，中国科学家就越不会被吓怕、被打倒，所有压力都会被转化为源动力”。

中国地质调查局天然气水合物试采现场指挥部指挥长叶建良，因长时间超负荷工作，加上上海极度潮湿的环境，风湿病时常复发，在室外四十摄氏度高温的情况下，仍需要穿着秋裤以对膝盖进行保暖。面对挑战，他鼓励技术人员放手去闯，“排除一切干扰，大胆创新”“新技术不试，怎么知道有没有用，面对挑战，要敢于担当、勇于创新、无畏艰险，只要坚持不懈，理想就会实现”。

常务副指挥长秦绪文，常常在凌晨两三点钟仍紧盯监控屏幕，第二天一早又来到办公室查看数据、询问进展。每次看他在办公室用眼睛水汪汪的眼睛，大家都心疼不已。

总工程师谢文卫，睡觉时对讲机必须放在枕边，否则难以入睡。他要求团队“闭上眼睛都能描绘出每一个施工环节潜在风险的应对措施”，严谨到极致。

叶建良、秦绪文、谢文卫、卢海龙……这些名字将报国之志融入中华民族伟大复兴的奋斗历程中。人生最大价值的实现方式莫过于此。



▲第二轮试采攻克南海浅软地层水平井钻采核心技术。

▲裹挟着白色颗粒状可燃冰的海底沉积物放入水中随即冒出大量气泡。(除署名外，均新华社发)