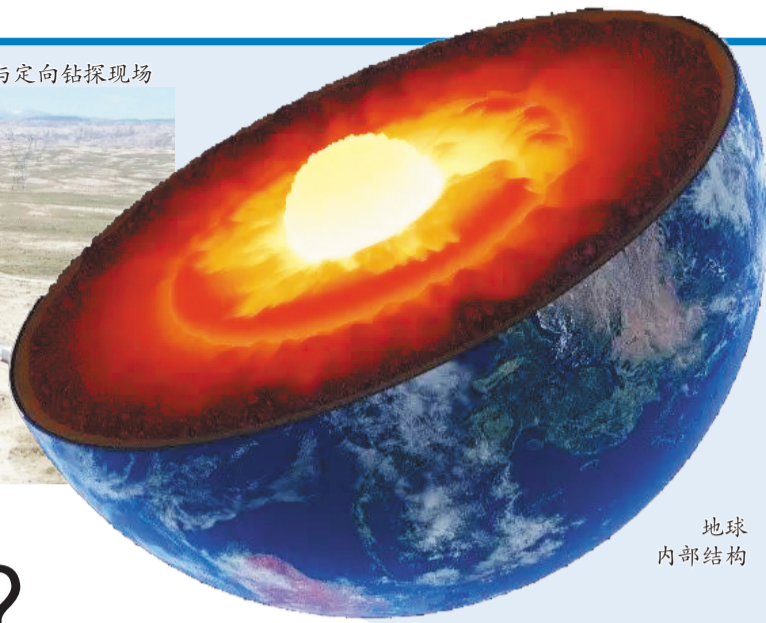


青海共和盆地干热岩压裂与定向钻探现场



地球内部结构

给地球插上插头？ 向岩石要热量！

从太空观察地球，我们会看到一颗蔚蓝美丽的星球。由于海洋的蓝色和森林的绿色都是冷色调，这样的地球可能看上去会让我们感到清朗凉爽。

不过眼睛总是会骗人，实际情况或许出乎大家意料。地球其实是一个外冷内热的小火球，内部蕴含着很高的热量。虽然不能与太阳这种大火球相比，但据估计地球中心的温度也达到了惊人的6000℃。

有学者认为地球热量来源主要有三个，一是地球内部放射性元素衰变产生的热量，二是地球内部致密物质下沉到地心时重力势能转化成的热量，三是地球形成时尚未散失的热量。总而言之，这些都是地球自身产生的热量。

这些能量能不能被人类利用起来？今天，就给大家介绍一种“未来能源”——干热岩。

地下除了温泉 岩石也很热啊

虽然地心高温，但据资料显示，地表年平均温度只有15℃左右。这是因为从地心到地表热量逐渐散失，温度越来越低，这也让地层中出现了地温梯度。在靠近地表的区域，平均地温梯度是3℃/100m，即每深入地下100m，温度就升高3℃；反过来，每向地表靠近100m，温度降低3℃。

发现这些来自地下的热量后，人类就想加以利用，将其称为地热资源，并按照产出方式分为水热型地热资源和干热型地热资源。

水热型地热资源可以简单理解为地下水。温泉就属于水热型地热资源，这是地下水冒出地表后的产物。还有一些地下水并不冒出地表，而是一直封存于地下。水热型地热资源的应用实例，除了泡温泉之外，在国内比较著名的就是西藏羊八井地热田了，1977年我国就在此建了一座地热发电站，并取得了良好效益。

相应的，干热型地热资源可以理解成虽然地下的岩层很热，但没有水或者只存在很少的水。一般是指埋藏于地壳3至10km深处、温度高于180℃（也有学者认为是150℃或者200℃）的高温岩体，因此干热型地热资源也被称为干热岩。

之所以强调3至10km这个深度，倒不是说更深的就不热了，而是因为更深的地方我们够不着了。目前人类最深的钻井记录是苏联的科拉超深井，花了20年时间才达到12.2km，而且耗资巨大。因此我们一般只关注那些地温梯度比较高，即挖得不深就能很热的地方，这里投入产出比比较高。中国的干热岩

资源主要集中在西藏羊八井地区、云南腾冲地区以及青海共和盆地等地。

干热岩的资源量是相当可观的。据麻省理工学院保守估计，地壳中可开采的干热岩储量接近1.3×10²⁷J，可供全球使用大约2.17亿年。而我国3至10km深度的干热岩资源据统计约为2.52×10²⁵J，大致相当于860万亿吨的标准煤。根据我国2021年的能源消费总量52.4亿吨标准煤计算，如果这部分干热岩可以实现2%的开采率，那么将能够维持我国3282年的能源供给。

不过，干热岩这种资源这么好，怎么还不开采利用呢？

能量诱人，开采不易

虽然干热岩资源的前景非常诱人，但开采起来困难极大，直到上世纪70年代才有了较大的理论突破。1970年，美国洛斯阿拉莫斯实验室提出了增强型地热系统(Enhanced geothermal system, EGS)的概念，基本原理是这样的：向地热储层中打两个井，注入井和生产井。向注入井中注入冷水，等冷水流经地热储层被加热后，再用生产井把热水抽上来，然后就能用这热水供暖或发电了，用完还可以将这些水导入地下循环利用。

这个方案乍听起来简便划算，等于说让冷水去地热储层串门后，就能带着热量满载而归了，但实际上存在很多工程技术上的难题。比如干热岩资源所处的地层往往又热又硬，钻井难度大、成本高；又比如干热岩储层可能致密不透水，注入的冷水无法向钻井周边扩散吸热，难以流到生产井被抽出。

尽管我们可以通过水力压

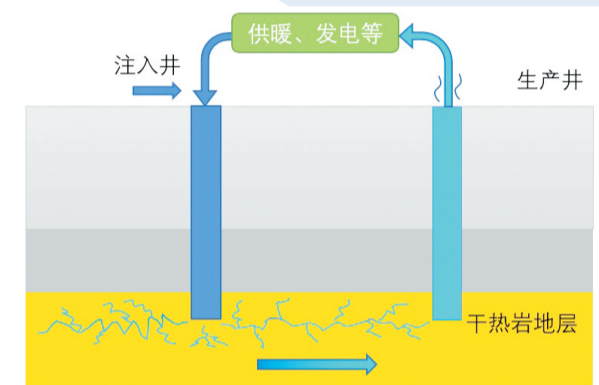
裂技术(注入高压水破坏储层结构，在其中形成裂隙网络)来改善储层的渗透率，但由于地下操作看不见摸不着，高压水注下去后，难以保证裂隙就只按我们想要的方向发展，万一它向远离生产井的方向发展，那我们注入的水就收不上来了。

1973年，美国开启了Fenton Hill干热岩试验项目，首次进行了EGS的工程尝试。虽然这个项目最终因钻井设备缺陷以及工程成本巨大等原因失败了，但也证实了EGS技术上的可行性，对干热岩地热开采起到了至关重要的推进作用。此后英国、法国、德国、澳大利亚以及日本等相继开展了一系列的EGS工程尝试，其中由法、英、德三国于Soulzt联合开展的EGS系统是目前世界上较为成功的EGS示范项目，于2008年实现了干热岩地热发电。

在欧洲的EGS技术成功后，美国、韩国和中国等国家也加速了这方面研究。美国能源部于2015年4月开始实施了“给地球插上插头”的干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”(FORGE)，计划在2050年将EGS发电的总装机容量提高到10万兆瓦，相当于4个三峡大坝。

韩国于2016年启动了国内第一个EGS项目尝试—Pohang EGS，其最终目标是期望实现1兆瓦(MWe)的发电示范。但在该项目启动后，2017年在项目所在地附近发生了一次5.5级地震，有研究认为可能是这个项目向地下注水时诱发了地震，因此这个项目被迫停止。

中国科学家2017年5月在青海共和盆地东部的GR1地热井3705米深处钻获了236℃的高温岩体，这是国内首次发现的埋藏最浅、温度最高的干热岩体；2022年1月，在共和盆地成



EGS工程示意图

功实现国内首次干热岩试验性发电并网，取得历史性重大突破。

除了传统的EGS方法外，还有学者另辟蹊径。其中值得一提的就是我国学者创新提出的重力热管技术，原理很巧妙：把一根导热性极好的管道插入到干热岩地层中，然后热管就会自动把热量传导上来。不过由于距离很长，只用热管的话可能采热效率不佳，为此我们可以向管中注入氨水，氨水受热后容易汽化，可以很方便地把热量以蒸汽的形式带上来，进一步提高了采热率。

《中国科学报》2022年1月报道了中国地质调查局与中科院广州能源研究所合作创新研制的国内最长的4200米重力热管采热试验装置。在雄安新区为期3个月的现场采热试验显示，单井短时采热功率可达1.3兆瓦，平均采热功率800千瓦，长期稳定运行可支撑供暖面积超2万平方米。这一技术突破也是我国科技工作者对世界地热资源开采事业的一大贡献。

干热岩开采的隐患 怎么解决？

有人担忧干热岩开采可能引发的问题。一是诱发地震，如前文提到的韩国地震。不过，事实上这里的地震问题主要是水力压裂导致的，其他使用水力压裂技术的工作比如页岩气开采等也可能引发类似的问题。而已有研究指出水力压裂对3级以上地震活动影响有限，同时水力压裂诱发的微地震可能有助于释放累积的地应力或能量，降低地震风险。此外还有学者认为水力压裂导致的地震是可以控制的。

二是影响地球寿命。地热

资源是地球自身热量的一部分，我们自作主张拿走了地热资源，有人担心会是杀鸡取卵。应该说地球内部的庞大热量确实是地球还“活着”的象征，它是地球上多种地质活动如火山和地震的动力来源，等哪一天它消耗用尽后，地球就可能冷却成月球那样，变成没有生机与活力的荒原。但大家对此其实不用太担心，因为人类获取的这一点热量相对于整个地球而言实在是九牛一毛。而且即便人类不拿走，地球也要通过火山或地震来释放自己的旺盛精力。

三是耗水量大，且影响生态环境。在EGS储层改造过程中，通常需要耗费数万立方米的水资源，如前文提到的Soulzt项目压裂液用量就超过10万立方米。而我国干热岩资源主要分布在青海、西藏等水资源缺乏及生态脆弱的干旱地区，水力压裂带来的水资源浪费和生态破坏等问题不能忽视。对此有学者提出了用超临界CO₂充当压裂液的方法，一来节约水资源，二来助力碳中和。目前是研究热点，希望可以早日大规模应用于实践。

总的来说，虽然很多国家都制定了开采干热岩资源的宏伟计划，但各国普遍还处于小规模试验探索阶段。中国地质科学院研究员王贵玲直言：“(干热岩开采技术)50年的时间没有特别明显的进展。”而中国因为起步较晚，技术积累方面相对更加薄弱。

但毋庸置疑的是，干热岩是极富潜力的未来能源，储量巨大，且绿色无污染，一旦在开采技术上实现了重大突破，就能很好地造福人类社会。

据中科院公众号、人民网、新华社客户端