

目的

- 论证在欧洲中等深度（500~700m）煤层中进行地下煤炭气化（UCG）的可行性。
- 从地面以偏斜钻进的方式在煤层中打长钻孔，并将这些钻孔与垂直钻井连通，形成一个良好的气体流通回路。
- 研制气化炉点火技术和气化孔穴扩展控制技术。
- 监视和测量气化炉燃烧情况以及产品气的质量和数量，编写地下煤炭气化工艺经济评估报告。
- 验证材料实用性和环境安全性。



图1 气化试验后钻井作业现场

概述

地下煤炭气化技术可提供一种洁净有效的能源，用于气化的煤层是那些常规开采方法不能开采或者开采不经济的煤层。

1988年，欧盟的6个成员国建立了欧洲地下煤炭气化工作组，该工作组提出了一个新的地下煤炭气化项目建议。该项目的长期目标是：通过进行现场试验和半商业化生产设备开发，示范验证地下煤炭气化技术在欧洲典型煤层中使用并达到商业化规模的可行性。

本文介绍的内容是整个地下煤炭气化项目中第一个现场试验子项目，该子项目是在西班牙特鲁埃尔（Teruel）矿区中等深度煤层中进行的。

现场试验中使用了定向钻孔和受控注入点后退技术（CRIP），这些技术是由石油和天然气行业开发的。一个钻孔（注入井）钻进到煤层中。另一个钻孔（垂直生产井）尽可能在煤层下部与注入井接通，这样可形成一个连续气化通道。

钻完井之后安装同心套管，以提供产气、注入气体、气体清洗和冷却水流动的通道。注入井中的蛇管用于对受控后退注入点（CRIP）进行控制。具体进行控制时，喷嘴（喷出气化剂，即氧气和水）和点火器均朝向煤层的某一特定区域。气化产品通过一条地面生产线，此时可以测定流量并对气体和冷凝产品进行取样。产品气可以火炬燃烧或炉内焚烧，收集的液体需要得到适当的处理。

现场试验达到了预期的主要目标：煤层内钻进、通道连接、受控后退注入点（CRIP）动作以及大量煤炭气化。气化试验之后的研究证实了煤层中孔穴的形状和大小（见图1）。

试验表明，在欧洲中深部煤层中进行地下煤炭气化在技术上是可行的。

该技术的潜在用户

能源开发和供应公司以及钻进设备生产商。

费用

该项目总经费为1748万欧元（约1200万英镑），其中欧盟的THERMIE项目提供了697万欧元，英国贸工部拨款1,548,950英镑（13%），其余费用由项目协作单位提供。

时间

7年3个月，即1991年10月至1998年12月。

项目承担单位

欧洲地下气化AEIE公司
(Underground Gasification Europe AEIE)
Calle Hermanos Nadal, 27-1 °
44550 Alcorisa (Teruel)
西班牙(Spain)

协作单位

Instituto Tecnológico Geominero de España(ITGE)
Ri ó s Rosas, 23
E-28003 马德里，西班牙(E-28003 Madrid,Spain)

Institution pour le Developpement de
1a Gazeification Souterraine(IDGS)
Rue du Ch é ra, 200
B-4000 Li è ge,比利时(Belgium)

前言

煤的利用方式主要是生成蒸汽来发电。将煤炭进行现场转化，远距离回收生成的能量，这种煤炭利用方式避免了煤炭开采过程。不论进行化学转化，还是制造水煤浆，都需要采用适当的技术，以保证煤以液体形态得到利用。

地下煤炭气化技术就是一种这样的技术，该技术尤其适用于常规煤炭开采方法不可行或开采成本不合理的情况。将来，我们可以采用地下煤炭气化技术开采英国埋藏深度较大的煤炭储量，包括北海（ the North Sea ）下的煤炭储量。

地下煤炭气化工艺

地下煤炭气化技术是在现场将煤炭转化成可燃性气体（氢气、一氧化碳和甲烷），气化过程煤与氧气和水（或水蒸气）发生反应。当煤被点燃之后，从注入井送入气化剂，燃烧过程是在煤层内的孔穴中进行的，气化产物通过生产井输出到地面（见图2）。

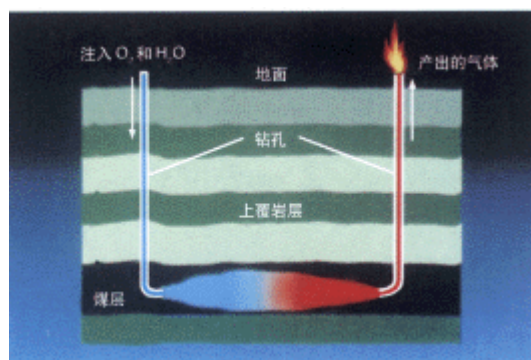


图2 地下煤炭气化工艺基本原理

美国进行的地下煤炭气化试验表明，为了扩大被气化的煤层区域，需要采用可移动的气化剂喷嘴。这项技术被称为CRIP操作技术，可以在地面采用机械控制的方式实现。

气化工艺的主要操作参数包括：地下反应器的压力、注入的气化剂流速、生产井底部的温度。所有参数都需要在地面进行控制。另外，现场试验中需要详细测量和确定输入和输出的气体流速、连续分析产出的气体组分、监测井下温度，并有可燃性气体排入大气之前的燃烧方法。

地下气化技术包括安装井下设备和地面设备，井下设备用于钻井和完井，地面设备用于输送和处理气体、工艺控制 and 数据分析。

各国针对地下煤炭气化技术进行了大量的工作。美国的研究工作主要是在埋藏较浅、厚度较大的次烟煤中进行的。1978-1986年，比利时和德国联合在比利时的图林（Thulin）进行了地下煤炭气化试验，试验煤层选择了欧洲西部典型的埋藏较深、厚度较小的低活性高变质煤层。

尽管在图林进行的地下煤炭气化试验取得的成果较少，但它证明：如果优化设计井下气化炉，对深部煤层进行气化在技术上是可行的。有关钻井、完井和工艺控制的技术问题还没有解决。特别地，针对欧洲煤层具体埋藏深度的气化技术还需要进一步研究，以实现气化工艺工业化的目标。

1988年4月，欧盟的6个成员国建立了欧洲地下煤炭气化工作组（EWG）。该工作组评估了在图林进行的地下煤炭气化试验结果，进行了欧洲UCG可行性研究，并提出了一个新的UCG项目建议。该项目的长期目标是：通过进行现场试验和半商业化生产设备开发，示范验证UCG技术在欧洲典型煤层中使用并达到商业化规模的可行性。

本资料总结了所提出的项目第一个现场试验情况。来自西班牙、比利时和英国的机构建立了欧洲经济利益小组-欧洲地下气化小组（UGE），该小组承担第一个现场试验，试验对象是西班牙特鲁埃尔矿区的中等深度煤层。

上述项目的主要工作任务包括：

- i. 准备工作（施工勘探井、注入井和生产井，施工地点选择）。
- ii. 进行气化试验，研究不同井型对气化过程的影响，对比不同的气化效果。
- iii. 研究煤层燃后的情况，对所获得的数据进行分析，修改和确定气化模型，通过钻孔来确定煤层孔穴的形状，进行腐蚀方面的研究，报告施工情况和进行施工现场恢复工作。
- iv. 在试验前、试验过程中和试验后连续监测环境状况。

准备工作

我们需要对所选择的施工地点的地质状况进行详细评估，分析煤层和附近岩层的情况。然后对井型进行设计和施工，

安装地面设备。该阶段的主要任务是：钻孔和完井，安装和调试地面设备。

施工地点选择

西班牙特鲁埃尔地区的欧里特-阿瑞奴 (Olite-Ariño) 煤田被选择为几个潜在的施工地点之一，原因是：该煤田的煤质、煤层厚度和埋藏深度符合所提出的煤炭气化项目的要求。以前的煤炭开采已使该煤田很著名。

该煤田的特瑞米达尔 (El Tremedal) 有两个可供气化的煤层、大量的地震勘探数据、安全的隔水层，并与其他矿有足够大的间隔距离。现场试验选择了其中一个煤层，该煤层的赋存深度为500-700m，非常适合地下煤炭气化试验。

煤质

试验煤层的煤质特性非常接近褐煤，被划分为次烟煤，其镜质组反射率为0.36-0.43%。

特鲁埃尔矿区的煤中低氮、高硫。硫含量为7.26%，其中55%为有机硫，45%为无机硫。由于煤中的硫分含量特别高，因此我们必须关注生产井和生产管线的腐蚀现象和材料选择。

勘探井研究

勘探井研究的目标是：采用常规的方法垂直钻井，获得两个煤层的准确厚度、深度、煤中的成分和上覆岩层的组成（见图3）。

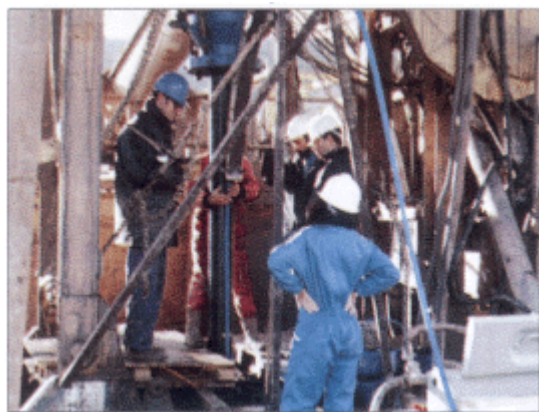


图3 钻机施工现场

试验发现，围绕生产井底部的下部煤层逐渐消失，上部煤层也发现有变薄现象，但在三个勘探井所围成的三角形煤层区域中存在2m多厚的煤层。另外，煤层中没有发现断层。因此，我们选择上部煤层为气化层。

试验地点的水文地质状况

研究表明，特瑞米达尔的水文地质条件非常适合于地下煤炭气化试验。我们利用现有的地质资料和钻孔数据来确定煤层上部的钠长石岩层和下部的侏罗纪岩层中的可渗透性岩层。

试验表明，任何一个煤层不会对周围的含水层造成污染。上部煤层与主要含水层的间隔距离比较大。上部煤层与砂岩层相连，可以作为一条短的气体循环流动通道。但流体物质将滞留在孔道中，不会流向含水层。这些情况同样表明：上部煤层宜作为气化层。

地下钻井

开始，我们先钻较难施工的井，即偏斜的煤层内注入井。我们需要准确地测量和确定煤层内注入井的施工位置，以便于垂直生产井能与其在煤层中相遇。如果具体施工时的连接效果不理想，可以采用水力压裂或逆向燃烧技术来改进两个井的连接效果。在本次现场试验过程中，偏斜的煤层内注入井和生产井连接顺利，不必要采用连接效果改进技术。

施工偏斜的煤层内注入井时，我们需要进行准确钻井定位、让钻杆以中等钻进速度进入煤层、利用"边钻边测" (MWD) 测井技术来准确控制孔底马达在煤层中钻进。定向钻井技术可以满足这些施工要求。注入井在煤层内的长度为100m，施工在煤层底部。

现场试验中，注入井的施工获得了成功，但发现维护煤层内的弹道状钻孔比预期要困难得多。施工过程中，煤层中钻孔曾与煤层倾斜方向之间有2-3°的偏斜角，使注入井末端稍微进入煤层下部的石灰岩中。经过45m长度纠偏后，钻孔又重

新回到煤层中。

通过对"边钻边测"测井结果和注入井弹道路径的陀螺仪最终测量结果进行比较表明，钻井技术的局限性更多地体现在孔底马达的控制上，而不仅仅是测量技术本身。（目前的钻井设备中"边钻边测"测井设备的安装位置靠近钻头，这可以显著提高钻进方向的控制能力。）

生产井的直径较大，垂直进入煤层中。偏斜的煤层内注入井的钻孔末端在1m的范围内与生产井相接。为了准确达到这一施工目标，偏斜的煤层内注入井按S形状钻进。在地面，注入井口和生产井口之间相隔150m。

生产井按照计划施工，利用定向控制技术可以获得非常高的施工准确率。陀螺仪测量结果表明，在井底的X-Y平面内最终弹道状钻孔与施工目标只差0.5m。用于保护煤层免遭矸石和过大的矿山压力破坏的技术使用效果良好。

施工的第二个注入井也按S形状钻进，其井底与煤层内偏斜井的轴心相距30m。注入井的内部只安装一条固定式内部管道，管道外侧是水泥密封套管。

在偏斜的注入井施工过程中采用了受控后退注入点操作技术（CRIP）。该技术涉及到机械移动及控制喷嘴和地面的点火器。为此，我们采用了石油和天然气行业使用的一种经过改进的设备。这种设备在地面使用一根特制的滚筒卷绕蛇管，并采用一个机械驱动的喷嘴控制着管线进入注入井中（见图4）。



图4 蛇管的使用现场

在卷绕的蛇管末端安装了一个功率大的喷嘴，用来点燃煤炭。该喷嘴由卷绕的蛇管内部的两条细小管子（"macaronis"）分别供给化学气化剂（ O_2 ）和可燃物（三乙基-硼烷或甲烷）。

地面安装

最终确定的试验场地占地面积1.85万 m^2 ，离Andorra-Alcorisa公路约2km。地面设备用于供给、处理、储存和注入工艺用液体，然后收集、分析和处理产品气和液体。考虑到安全和地形因素，我们安装了不同的平台以满足设备供给、生产和控制部分的操作要求。地面安装过程按照计划进行。

过程监视和测量系统

我们连续测量注入管线中的氧气、氮气和水流，并将测量数据作为工艺控制循环系统的反馈信息。

地下气化反应器中的压力必须与静水压力接近，以避免地下水涌出或气体流入到周围岩层中。为此，我们应当在地面井口测量压力，在生产井的每一个环管都需要进行测量，并利用生产井的压力控制阀来控制压力。

为了测量地下温度，我们采用了一组标准的热电偶和光导纤维系统。该系统能够显示熔衬烧损的长度。

我们测定了每一条生产管线中产品气的流速。气体分析设备在线测量气体成分。我们采用气体制冷系统将固体和冷凝物从取样管线中清除掉。

煤消耗量、地下水涌入量和地下气体损失量不能直接测量到，需要根据参加气化过程的元素质量平衡来计算。在计算过程中，我们作了一些假设，例如假设留在地下的半焦组成，这些假设必须使质量平衡数学公式成立，也给试验结果带来了不确定因素。

氩是工业级液体氧气和氮气中的杂质，可作为评估气体产出率的自然示踪气体。

从已知容积和压力的容器中释放出的脉冲氦示踪气体掺入到氧化剂气流中，可用来监测地下煤层中气化孔穴的扩展动态。

气化试验情况

气化阶段（见图5）涉及到煤的干燥、加压和点燃过程以及采用受控后退注入点技术来控制孔穴的扩展。通过试验我们确定了一些特定参数，例如反应器的使用寿命、孔穴扩展机理、排气效率、能量效率和气体质量。

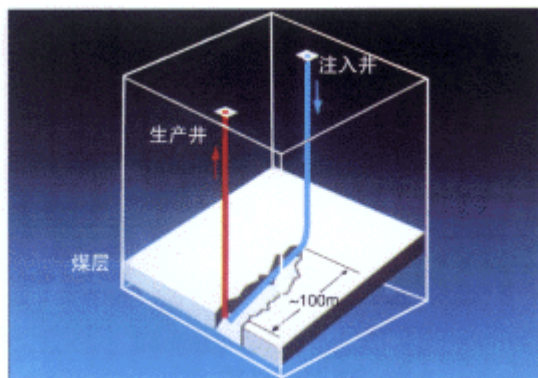


图5 气化初始阶段

试验过程

1997年6月30日，我们进行试验以确定注入井和生产井之间存在良好的水力联系。7月21日，我们在生产井底部附近进行了第一次点火，整个试验持续了9个工作日。

1997年10月1日，我们采用了一个受控后退注入点，并成功地进行了第二次点火。在这次试验过程中，O₂的注入速度得到了迅速提高。

1997年10月4日，我们进行了第三次点火试验，采用了两个受控后退注入点。16个小时以后，由于进行井内过早减压，导致一条通道内的气化过程结束。整个气化过程最终于1997年10月6日结束。

1998年3月，生产井的完井套管被取出，以进行检查和腐蚀性试验。1998年6-7月，我们进行了气化后针对孔穴的钻孔和取芯试验。

1998年9月，我们使用高压混凝土对试验井进行了完全封闭。同年12月，设备被完全拆除。煤炭气化的时间总计301小时。

性能分析

由于开始钻井时施工准确率非常高，因此没有必要在注入井和生产井之间另外建立连接通道。在试验过程中，各井之间的气体流动循环通道得到了良好地维护。煤层顶板冒落的岩石和井底可能积聚的焦油、碎石或水没有对气体流动产生较大的限制。

受控后退注入点操作技术(CRIP)可以调整注入点的位置，使气化孔穴的扩展方向朝向注入井。只有在钻孔与煤层接触的地方才可能点火成功，在煤层下方的碳质石灰岩中不可能点火。在弹道路径的中间部分也不可能点火。

第三次点火位置位于石灰岩段的后部，该处钻孔通道与煤层接触充分。受控后退注入点操作过程很成功，但点火过程没有得到控制，最终失败了。

气化试验的目标是：沿着钻孔注入通道，采用受控后退注入点操作技术来产生一系列相互连接的孔穴。整个试验过程分三个阶段，其中两个阶段实现了持续气化过程。

第一个试验阶段持续了9天，其间O₂注入速度比较慢。所获得的产品气的质量与预期的试验条件下的理论值非常接近，气化操作和工艺控制过程进展令人满意。然而，进行气化的第二天之后，地下水的涌出量远远超过预测值，其原因可能是由于孔穴扩展接触到煤层顶板上面的高渗透性砂岩层。

通过对地面设备作性能改进，气化第二阶段的工艺过程处于我们的完全控制之下，且O₂注入速度显著加快。O₂的注入速度被迅速提高到设计的700m³h⁻¹，以快速升高孔穴中的温度。该试验阶段的产品气质量非常高，地下反应器和地面设备均得到了良好地控制。随着O₂注入速度的变化，气化过程反应灵敏性良好。

虽然气化过程进展顺利，但我们还是决定进行第三阶段试验，以在未采动煤层中获得更大的孔穴。在第三次点火之前，我们调整好受控后退注入点(CRIP)，并停止注入氧气几个小时。

在第三阶段试验过程中，通心粉供给管道中发生了堵塞，该管道负责将三乙基-硼烷和甲烷输送到燃烧器中。这种堵塞现象不可能疏通，因此延迟了点火时间，导致井下发生爆炸，损坏了注入井。几个小时之后井中发生了突然压力损失，气化过程停止，试验最终搁置起来。

气化试验没有能够实现在钻孔的整个长度范围内形成一个气化通道。但蛇管的操作过程及其重复点火的能力取得了令人满意的效果。今后需要采取措施改进注入井的运行安全性，避免类似井下事故的发生。

逆向燃烧和第二次气化试验的目的是，检验利用过滤工艺重新气化已气化的钻孔通道周围的煤的可行性。垂直的注入井离钻孔通道轴心的距离是30m（见图6）。以往的经验表明，我们需要利用逆向燃烧技术来获得必要的渗透性。

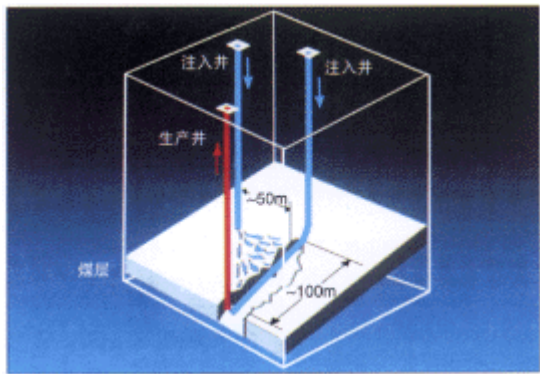


图6 过滤气化阶段

尽管第二口注入井已经施工完毕，但由于开始试验的井中发生堵塞现象，导致钻孔通道气化试验突然被迫终止。想继续获得气化试验成功根本不可能。

试验结果

气化过程所测得的数据列于表1中。

表1 气化过程测得的数据

	总计	7月	10月	预测值*
注入量 (吨)				
氧气	88	34	54	
氮气	80	52	28	
产品气 (吨)				
生产的气体	443	117	266	
气体损失量	183	74	110	
干燥气体组分平均含量 (%，括号内的数值为无水无氮基)				
二氧化碳	41.0	43.4	39.4	36.0 (40-60)
一氧化碳	12.8	8.7	15.6	16.6 (10-20)
氢气	24.8	24.9	24.7	21.0 (15-30)
甲烷	13.2	14.3	12.4	16.0 (10-25)
硫化氢	8.3	8.8	7.9	4.6 (1-5)
LHV** (干燥基) (kJm ⁻³)	10907	10907	10907	11000
地面的平均功率	3.19	1.26	4.48	
HHV** (MW)				

*括号内的数值是项目刚提出时估计的组分含量；

**LHV和HHV分别表示低热值和高热值。

质量平衡计算结果列于表2中。表中的一些未知参数（如半焦生成量）为假设的数值。

表2 物质平衡计算结果

吨数	总计	7 月	10 月
受影响的煤	293	94	199
涌水量	406	91	315
气体损失量	183	74	110
半焦生成量	61	10	51

表2中, "受影响的煤"包括被气化和被热解的煤。气化是指在有氧气的条件下将煤或半焦转化成气体；热解是指在没有氧气和高温的条件下将煤转化成半焦。

"涌水量"是指从周围岩层涌入到气化炉中的全部的水,表中的数值是测量值。只有一部分水通过反应区；大部分水将绕过反应区,直接涌入到生产井的底部,否则反应区将被大量的水浇灭。

根据质量平衡原理,我们可以估计从气化炉渗透到地下周围岩层中而损失的气体总量。

建议和结论

通过气化获得的产品气的组分含量处于预测值的范围之内。

在气化过程的第二阶段,随着O2注入速度的变化,产气量也发生相应的变化,但气体质量保持不变。气化过程可以稳定进行,并保持高度的灵活性。气化启动既平稳又快速。

在整个气化试验过程中,我们没有向井中注入水。这是由于井下的涌水量比预计的高,能够满足气化过程中化学反应的用水量。煤层上部的高渗透性砂岩层有利于水的涌出。

从孔穴向煤层上部的高渗透性砂岩层中损失的气体量比预计的数值要高,导致气化效率的降低和地面注入的气体向周围岩层中的流失。如果井下的地质条件良好,可以减少或防止气体损失。

试验结果表明,由于涌水量大而导致的现场热值损失不利于维持最优的热力条件。尽管如此,我们还是获得了优质气。如果地质条件好一些的话,产品气的质量和气化效率可以进一步提高。

与其他气化实验和工艺的对比

表3中对比了美国在浅部煤层中进行的申特拉利 (Centralia) 气化试验与我们的试验得到的产品气的质量。这些对比结果表明,高压气化比较有利。欧洲地下气化小组获得的产品气的净热值与地面煤炭气化的数值类似,均高于申特拉利气化试验的产品气净热值。

表3 气体质量比较

工艺/试验	UGE	申特拉利	地面气化
	产品气	产品气	净化后的气体
工作压力 (Bar)	53	4	25
气体组分 (%)			
二氧化碳	41.0	34.9	3.87
一氧化碳	12.8	20.8	60.51
氢气	24.8	38.1	22.08
甲烷	13.2	4.7	0.01
硫化氢	8.3	1.5	0.00
氮气	无氮基	无氮基	13.53
LHV (无水基) (kJm ⁻³)	10907	8734	10029

- 与地面的气化反应器相比,井下现场煤炭气化具有下列潜在的优点：
- 从技术和经济的角度来讲,我们可以采用较高的压力。井下煤炭气化的压力上限是岩层的断裂压力,其数值约与深度成正比。
 - 不存在灰分处理问题。
 - 操作灵活,允许工作压力有较大的变化范围,因为不必要随时使注入气体和产出气体的速度相匹配。
 - 稳定气化时间较长,有利于工艺控制。

燃后工作

燃后工作主要是调查孔穴的形状和井下剩余成分。

钻孔和取芯

燃后钻孔的目的是获得气化炉几何形状方面的数据，从孔穴中取样以进行化学和岩相分析。向孔穴中钻孔和取芯时，需要先打一孔垂直井，然后向孔穴中打三个偏斜的钻孔（见图7）。

通过钻孔，我们发现煤层上部的砂岩层受到了孔穴的扰动，孔穴的上部边界在钻孔之上。据估计，孔穴的宽度至少是煤层厚度的5倍。钻孔结果证明，由于最后一个注入点的影响，孔穴向后部有一定程度的扩展。

在钻孔取芯时，煤层下部岩层中的部分岩石（碳质泥岩和石灰岩）也被采集上来。岩芯管中没有发现煤层中的物质。为此，我们认为这可能是由于煤在气化过程中消失了，或者剩余的炭和灰分太分散，没能够采集上来。

我们从生产井的底部收集到孔穴中的半焦、灰分和“受影响的煤”的样品。对样品的分析结果表明，采集的大部分煤粒得到了气化过程的强烈作用，热解程度很高。根据比表面积进行分析，测得的孔隙与特鲁埃尔矿区部分热解的炭类似。

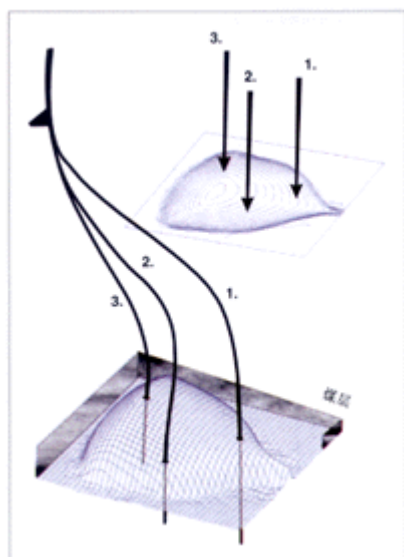


图7 燃后向孔穴中钻进的取芯钻孔弹道路径

腐蚀性调查分析

我们从生产井的内部管道和地面生产管线中取出金属样品，分析所选择的合金的适用性。我们没有发现因选材不当而导致的腐蚀现象。但是，我们需要进行更长时间的气化试验来确定所选材料的腐蚀性能。

环境影响

大气排放物

煤中含有的硫分和有机氮将留在地下煤炭气化的产品气中，以硫化氢（ H_2S ）和氨（ NH_3 ）的形态存在。由于这些产品气是在高压的条件下（在地下煤炭气化试验中的压力为53bar）生成的，其中的污染物可在地面利用成熟的商业化技术分离出来。一旦污染物从产品气中分离出来，一座综合的地下煤炭气化/联合循环发电站将排放极少的二氧化硫，其氮氧化物排放量也比常规的燃烧工艺少得多。

地下煤炭气化试验的产品气中含有大量的二氧化碳（ CO_2 ），产品气经过燃烧之后排放的二氧化碳比常规的燃煤电站的排放量要大。但是，如果煤层赋存的地质条件好， CO_2 的生成量将减少，产品气燃烧之后的 CO_2 排放量也会显著降低。

利用地下煤炭气化的高压条件，产品气中的 CO_2 可以被分离出来，也可重新注入到废弃的煤层孔穴中。

地下环境影响

地下煤炭气化过程可导致孔隙中的气体损失和受到污染的水流到周围的岩层中。取样分析表明，气化炉中的污染物主要是酚，还有少量的氨和硫化物。这将影响水中对化学氧和生物氧的需求量，改变水中的pH值水平。

如果地下气化炉离含水层较近，通过正确选择工作压力我们可以减小地下水得到污染的危险和气体损失量。

获得充分的气化试验区的地质和水文地质资料对确定地下煤炭气化的工作参数至关重要。合理选择气化煤层也可使对环境的影响小。

在地下煤炭气化过程中，我们应当监测地下气化炉周围岩层和试验区附近地面水的变化情况，以探测任何意想不到的事情发生。

气化试验结束之后，煤层中孔隙及其周围区域将受到污染，充满孔隙的水中含有大量污染物。必要的话，可以将这些水抽到地面，采用氧化剂进行处理，可以使用的氧化剂包括过氧化氢（在特瑞米达尔气化试验中使用效果良好）、臭氧、氯和其他产品。

在特瑞米达尔试验区，孔隙中的水值得到了监测和分析，以评价地下煤炭气化过程对环境的可能影响。研究表明，气化试验结束后孔隙水中的残留污染物含量非常低。

地表下沉

正如常规的煤炭开采方法，地表下沉是限制对地下煤炭气化煤层选择的一个潜在因素。目前还没有试验数据可用来评价深部煤层被气化之后地表的下沉程度，在特瑞米达尔试验区中产生的较小尺寸的孔隙不足以提供有用的数据。

地面受到的影响

在商业化试验区，钻井的区域和设备本身可以远远地分隔开来，它们之间由管道系统进行连接，随着井下煤层被气化而枯竭，地面的管道系统可以重新敷设，以气化新的地下煤层。偏斜钻井技术可以允许地面井口适当地集中布置。

为了安装笨重的钻井设备和管道，我们需要整修表土，将表土夯实。另外，钻井作业时需要找一块适当的地方处理泥浆。

由于地下煤炭气化中反应器是在地下，非气化物质留在井下现场，因此地面设施和设备运转对环境的影响程度要比常规开采方法和发电站小。与其他技术相比，地下煤炭气化技术中不需要许多工艺设备安装、煤炭储存、矸石堆集和运输轨道敷设等环节。

经济合理性分析

我们进行第一次地下煤炭气化试验时没有打算评价其经济合理性。为了评价生产过程的经济合理性，我们需要获得更多的试验数据。

1988年，欧洲地下煤炭气化工作组进行的在欧洲开展地下煤炭气化试验的可行性研究中包括"技术经济性评价"一项。研究结果表明，在适当的条件下，地下煤炭气化可以提供具有竞争性的合成气，以满足将来对能源或化学品的需求。评价过程基于一系列的假设条件，被假设的因素包括钻井和运转试验井的成本以及从局部煤层中气化煤的单口井的气化能力。

在特瑞米达尔试验区的研究结果表明，在中等深度煤层中气化产生的孔隙宽度至少可与欧洲工作组研究的宽度值一样大，且每平方公里内需要打的钻井数量可能是较实际的。

巨大的投资费用与地质调查和钻井结果有关。我们使用了四台钻机，分别用来打勘探井、生产井、监测井和燃后取样井。通过试验，我们积累了较丰富的钻井经验，只要进行周密的计划和组织，试验成本将可以保持在较低的限度内。

为了选择最佳的商业化气化位置，我们需要对煤炭储量和煤层周围岩层进行大量的调查研究，然后才能投资施工生产井和安装地面设备。地下煤炭气化的经济性可能随气化位置的不同而不同，煤炭储量要具有一定的规模，这样经过长时间的气化生产以后，勘探费用可以得到回收。

以后进行地下煤炭气化时，首要的工作应是评价产品气生产和使用的经济性。

结论

- 本文研究了在欧洲中等埋藏深度（500-700m）煤层中进行地下煤炭气化的可行性。
- 最新采用的定向钻井技术特别适用于在煤层中施工气体流动通道。
- 我们对中等埋藏深度煤层的气化过程有了深刻的认识，掌握了煤层在多大的压力下易于燃烧，气化效果良好。我们提高了对孔穴扩展机理的认识。
- 进行地下煤炭气化时，对地质和水文地质条件进行详细研究是至关重要的。
- 注入井和生产井运转顺利。受控后退注入点操作技术（CRIP）使用效果良好，开发了地下煤炭气化工艺的点火和控制技术诀窍。
- 为了防止注入井中的气体逆流现象和注入井的损坏，我们需要采取必要的安全保护设备。另外，我们需要对气体点火系统进行局部重新施工。
- 气化过程反应灵敏。当氧气注入速度提高时，产品气产出速度几乎同时增大，反之亦然。我们发现气化过程可能可以暂停一段较长的时间（例如几天或更长的时间），然后重新注入氧气再进行气化。这一点还没有得到证实。如果这一点成立的话，将对地下煤炭气化发电非常有利。
- 从气体处理和CO₂分离的角度来讲，地下煤炭气化技术具有潜在的环境效益。作为污染源的气化孔穴目前得到了人们更好地认识，但是孔穴中的气体和液体向周围岩层中的扩散问题需要大量进一步的研究。

未来技术发展预测

- 通过在西班牙特鲁埃尔矿区中等深度煤层中进行的试验结果，人们对地下煤炭气化技术的应用前景有了 更深刻的认识。一系列的技术问题得到了解决，人们对将来进行此类项目，不论是试验性的还是半商业化的，有了更大的成功把握。
- 从产品气的质量和孔穴扩展的角度来讲，深部煤层气化的优越性非常大，可以作为将来地下气化发电和生产化工产品的评价依据。
- 在未来的10-15年中，地下煤炭气化发电可能会变为现实，并成为目前的高效发电站的补充电力。地下煤炭气化的经济合理性还没有确定，如果目前剩余的技术问题得到了很好地解决并且经济合理的话，地下煤炭气化技术可以作为欧洲利用自己的煤炭资源进行气化发电的战略性选择。
- 地下煤炭气化可以作为欧洲的目前不可开采煤炭储量的开发措施，特别是北海下赋存的极其丰富的煤炭储量。
- 深部煤层地下气化技术对环境的影响也应当引起人们的重视。与天然气循环发电技术相比，地下气化发电可以减少温室气体的排放量。
- 地下煤炭气化技术的出口前景也非常可观。可供出口的地下煤炭气化关键技术包括：钻井、完井所需要的特种钢、工艺施工工程和现代化的发电设备。技术出口的潜在市场有：东欧、亚洲和拥有丰富煤炭储量的其他地方。

Roshan Kamal, Location 1124, Department of Trade and Industry,
1 Victoria Street London SW1H 0ET

Tel: +44(0)207 215 6261

Fax: +44(0)207 215 2674

E-mail: roshan.kamal@hend.dti.gov.uk

Web: <http://www.dti.gov.uk/ent/coal>

煤炭信息研究院负责英国洁净煤技术项目资料的
翻译、出版及散发，欲获得本项目资料及有关出
版物或洽谈合作，请联系：
煤炭信息研究院 洁净能源与环境中心
胡予红 主任
北京朝阳区芍药居35号，中煤信息大厦，100029
Tel：010—84657806
Fax：010—84657806
Email：ceec@public3.bta.net.cn
Web：<http://www.coalinfo.net.cn>



Department of Trade and Industry

项目概述

017
英国贸工部

1999年3月