 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i2.9329

Karst Treatment in Small Cross-Section Mountain Tunnels for Oil and Gas Pipelines

Shuo Zhang

Sinopec Petroleum Engineering Zhongyuan Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

In China, the mountainous terrain at the boundary between the upper and middle reaches of the Yangtze River features highly developed surface karst caves and subsurface karst formations. Constructing small cross-section oil and gas tunnels through these karst zones presents significant treatment challenges due to the inherent spatial constraints of the construction operations. The effective treatment of these karst features is often critical to ensuring the long-term, stable operation of the subsequent pipeline. Drawing on the karst treatment experience from the Houshan Tunnel of the Three Gorges Dam Bypass Refined Oil Pipeline Project, this paper details key procedures for initial support installation and investigation methods upon karst exposure. It outlines measures for karst cavity backfilling, presents the design philosophy for waterproofing and drainage systems, and provides specific practices and critical considerations for both initial support and secondary lining reinforcement. The paper offers valuable treatment approaches for karst management in similar mountain oil and gas pipeline tunnels..

Keywords

Tunnel Engineering; Small Cross-Section Tunnel; Karst Treatment; Oil and Gas Transportation

油气管线山岭小断面隧道岩溶治理

张硕

中石化中原石油工程设计有限公司，中国 · 河南 郑州 450000

摘　要

中国长江和中下游分界出山区地表溶洞和地下岩溶发育，在这一地区施工的小断面油气隧道穿越岩溶时往往因自身作业空间的局限，造成处治难度大大提升，往往对这些岩溶能否合理处治是后期油气管道能否平稳、长久运营的关键。本文依据三峡翻坝成品油管道后山隧道岩溶处治经验，详细介绍岩溶揭露初期支护、探测要点，给出岩溶回填措施、防排水处理理念，提供隧道初期支护做法及二次衬砌加固做法及细节考量，对相关油气管线山岭隧道岩溶治理提供处治思路。

关键词

隧道工程；小断面隧道；岩溶处理；油气输送

1 工程概况

三峡翻坝成品油管道工程后山隧道全长 1625.6m，断面尺寸 3.0mX3.5m（宽 X 高），最大埋深约 161.4m，坡度约为 3.6°，采用钻爆开挖，洞内 3 根管线采用支墩架空敷设。该隧道在施工过程中的围岩情况一直为薄层灰岩夹页岩，厚度约为 3mm~10mm，最厚约为 15cm，即使有超前支护爆破时极易因震动造成拱顶顺层坍塌，隧道在穿越 K1+117.5~K1+130 段遭遇岩溶，岩溶段原设计支护等级为Ⅳ级破碎，初期支护采用 4m 长 ø42 超前小导管和间距 1m 的工 16 钢拱架以及 250mm 厚 C25 挂网喷射混凝土进行支护。因此，治理软弱破碎围岩、预防岩溶灾害以及岩溶排水成为本条隧道岩溶段处理时的重要难点。

2 隧道施工差异

油气管线小断面隧道，以国家管网 DEC 文件《油气管道工程隧道典型图集》为例，其中最大的隧道断面仅为 4.4mX3.8m。开挖断面较小对山体的影响较小，但施工空间有限，相比于铁路、公路隧道，油气管线小断面隧道不设置安全部距，施工工序通常为开挖 - 处治 - 初期支护，待隧道贯通后，在进行二次衬砌整体施作。因此，初期支护是长时间安全施工的重要结构，其稳定可靠非常重要。

3 处理方案

3.1 岩溶揭露准备工作

后山隧道在里程 K1+117.5 处揭露岩溶，初始揭露形态为底板与掌子面交界处向下发育的狭长溶槽，以及左侧掌子面沿隧道轴向发育的另一条狭长溶槽，溶槽内可清晰辨识落

【作者简介】张硕（1996—），男，中国河南郑州人，本科，初级工程师，从事隧道工程研究。

水声（图 1）。根据现场情况无法判断岩溶内部情况，但根据溶槽发展方向和内部水流声，前期我们可进行三项准备工作，为进一步揭露溶腔做准备。

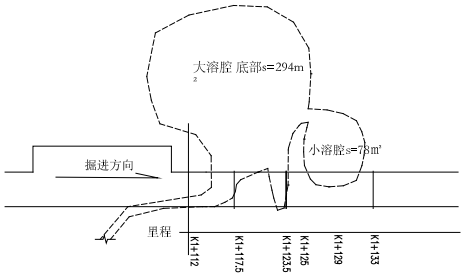
（1）初期支护加强措施。为保证本循环隧洞稳定，减少围岩变形对隧洞造成的影响，并保证已揭露岩溶稳定，采用 1）工 16 钢拱架、ø108 超前管棚、3.5m 长 ø22 系统锚杆支护进行超前支护，钢拱架间距 0.5m，管棚搭接长度 2m，保证至少两层管棚打入岩溶内稳定围岩层内；2）钢拱架间采用 ø22 钢筋连接，环向间距 300mm，采用 ø8 钢筋网片进行挂网喷射 C25 混凝土 200mm 厚。

（2）复测开挖段围岩。地质雷达对底板及拱壁进行复测结果判断 K1+090-K1+117 段已开挖段底板侧线左侧、中部存在串珠状填充型或半填充型裂隙以及贯通型岩溶裂隙。该隧道采用水泥砂浆注浆加固处理里程 K1+090-K1+117，注浆压力为 0.5~1.0Mpa，注浆管采用 8m 长 ø42 尖头花管，间隔 3m 布置。注浆为间歇式注浆，每次注浆 15~20min 后暂停 5min，允许浆液扩散 [1]，保证隧道周围 15m-20m 范围内不存在半～径大于 3m 的溶腔。

（3）调查岩溶发育情况。通过专业岩溶探查和地表调查可以初步确定隧道与岩溶位置关系以及更好的判断溶腔内水流来源及走向，明确岩溶水流向可以提前规划排水通道，尽量避免破坏原溶洞底部原有的过水通道 [2]。通过溶槽探查，发现底板溶槽联通一个较大溶腔，为岩溶水流经通道。大溶腔位于隧道开挖轮廓线底部偏左，下宽上窄，深约 25m，大溶腔顶部与一个小溶腔底部相连，有水流流出，水源为地表水，落水在大溶腔汇集成潭从揭露点的溶槽下方流出，从开挖路径可以判断隧道也将穿越小溶腔。

（4）溶槽处理。在保证排水顺畅的前提下进行初步处理，采用 35cm~50cm 块石及碎石塌落回填至开挖底标高，为钻孔作业和超报探测提供作业面。





3.2 岩溶爆破控制

岩溶初期揭露情况分为 K1+117.5-K1+123.5 处的倒悬岩石，第二段为小溶腔腔壁的一部分，直入山顶，两处山体都存在全断面爆破垮塌的风险，此种情况下应更改爆破方式和控制爆破药量。

（1）控制爆破进尺。爆破在超前支护完成后 12h 进行，进行炮眼施工深度控制在 0.5m，爆破进尺单次循环控制在 0.5m。

（2）进行分次爆破。影响围岩稳定的因素还和爆破方式与单次最大响药量密切相关 [3]。分次爆破按照掏槽爆破、掘进爆破两步，最终通过人工修边形成隧道开挖轮廓。掏槽爆破不得超过 0.5m，宜采用直眼掏槽方式，形成槽腔后，再爆破剩余部分，两次爆破的药量可控制在 200g-300g。

3.3 溶腔处理方案

岩溶两处溶腔发育与隧道位置各不相同，隧道受力方式也不同，隧道除底板左侧部分悬空于大溶腔腔体内，其余结构均在围岩内，在小溶腔中隧道右侧嵌入围岩内，左侧悬空于溶腔内，因此，为与大溶腔的隧道拱架支撑易失稳，而小溶腔隧道易产生来自于右侧山体的偏压，基于此情况，对两个溶腔的处理也做了区分。

（1）大溶腔采用 35cm~50cm 块石及碎石完全回填至隧道开挖轮廓线，在回填顶部浇筑 100mm 厚 C25 混凝土板支撑拱架，小溶腔来水通过回填块石间隙排放至原水路排除，爆破后的洞渣同时随水流排出，减少堵塞风险。

（2）大溶腔沿用岩溶揭露准备工作中的初期支护加强措施，采用工 16 钢拱架、ø108 超前管棚、3.5m 长 ø22 系统锚杆支护进行超前支护，钢拱架间距 0.5m，管棚搭接长度 2m，钢拱架间采用进行挂网喷射 C25 混凝土 200mm 厚。

（3）隧道小溶腔嵌岩位置初期支护做法同大溶腔，悬空于溶腔一侧的钢拱架仅设置 ø22 连接钢筋，和 ø8 钢筋网片，该部分的拱架用于承担上部围岩压力。在清理拱顶孤石后，凌空的围岩底部嵌入 16 号工字钢斜撑进行支撑，工字钢底部与溶腔内每榀钢拱架焊接，形成有效传力结构。工字钢斜撑与围岩、钢拱架形成的三角区域内采用钢筋网片、C25 混凝土填充密实。

（4）小溶腔底部至开挖轮廓线后约 7m 深，向上发育约 21m，顶部存在一处落水点。小溶腔底部采用回填至开挖轮廓线，回填顶部浇筑 100mm 厚 C25 混凝土板支撑拱架。待初期支护施工完毕，继续采用 35cm~50cm 块石及碎石回填至拱架顶部，降低来自另一侧山体对拱架偏压，保证二衬浇筑前的稳定性。溶腔向上发育部分因常年水流冲刷具有一定自稳性，可不做处理。

（5）小溶腔顶部高落水点与地表洼地联通，夏季水量变大，冬季水量骤减或干涸。为减少高出水流长时间冲刷，有序组织排水，里程 K1+127 处设置一道 300mmX500mm（宽 X 高）截水墙内测浇筑 100mm 厚 C25 混凝土隔水层并铺贴

2mm 厚防水板。回填块石最低点设置 1mX1m（长 X 宽）集水井，落水从此处汇集排向大溶腔。

3.4 二次衬砌加强措施

后山隧道大小溶腔里程为 K1+117.5~K1+130，总长度为 12.5m，二次衬砌跨越长度向进出口方向各延申 3m，其壁厚为 300mm，底板厚度为 500mm。为满足跨越要求，增强刚度，在二次衬砌两侧拱脚位置贯通设置 300mmx500mm（宽 x 高）暗梁，长度为 18.5m。隧道二次衬砌内也做排水通道之一，预防淤塞导致水流汇集在溶腔内，对衬砌造成较大压力，在小溶腔 K1+125~K1+132 的二衬中预埋 ø100PVC 排水管联通溶腔内，管一侧设置反滤层，排水管高于二衬底板 300mm，间隔 1m 均匀布置

4 岩溶段处治效果

因小断面隧道施工空间有限，一定会对回填的块石和碎石的密实度造成影响，导致溶腔回填区域产生沉降。通过新奥法进行监控量测对隧道拱顶、拱壁、拱脚设置观测点，对初期支护进行沉降观测，按照每 10m 设置一处断面观位置，每处位置观测点不少于 5 个，分别观察拱顶点、收敛点以及拱脚脚点，对变化最剧烈的点位进行监测，有助于判断隧道围岩变形对初期支护的影响，判断标准为：当隧道变化速率大于 1mm/ 天，围岩处于急速变形状态，应加强初期支护；当隧道变化速率在 0.2~1.0mm/ 天，应加强观测，做好加固准备；当隧道变化速率小于 0.2mm/ 天，一般认定围岩已经处于稳定状态。后山隧道通过连续监测，其日平均速率为 0.1mm/ 天，最终监测沉降深数据见表 1。该隧道贯通后继续作为联通相邻隧道的运输通道，经过长时间重载车辆通行，沉降稳定后的未发现异常现象，表明隧道岩溶处治做法达到了预设效果。

5 结语

小断面油气管线隧道岩溶时的处治方式要遵循便捷、经济、安全的原则，因岩溶形成有其自身的稳定性，其主要处治难点在于隧道底板稳定性、衬砌均匀受力和合理排水通路，依据这三点可对小断面隧道处治思路做简单总结：

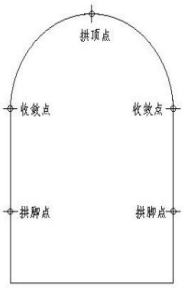
（1）底板复测。小断面隧道开挖底板多以山体基岩为承载，岩溶和山体经过爆破开挖会形成围岩塑性区，其范围随着岩溶尺寸、隧道洞泾增大而增大，随两者间距增大而减小，若塑性区出现贯通，对整体稳定性将造成伤害 [4]。

（2）畅通排水。溶腔通过水流冲刷形成，大部分岩溶隧道都伴随流水，因此原排水畅通和应急排水方式的双保险考量就十分重要，可以极大的缓解雨季造成的排水压力，同时减少应排水不畅，对后期运维带来的风险。

（3）减少隧道偏压。在初期支护完成后进行对向回填，将没有山体覆盖的部分掩埋，防止隧道开挖后山体徐变造成一侧拱架受力过大，对初期支护结构造成破坏。

表 1 拱壁、拱顶、脚累计变化量统计

里程	拱顶点（mm）	收敛点（mm）	拱脚点（mm）	
K1+110	3.8	3.7	3.5	3.7
K1+120	3.9	3.8	3.8	4.0
K1+130	3.9	3.7	3.9	4.0
K1+140	3.9	3.7	4.2	4.0



根据上述总结和合理的支护形式，穿越岩溶段落的后山隧道能够保证自身的稳定性，其回填的块石及碎石的做法不仅施工便捷，而且能起到很好的排水功能，保证排水畅通。同时，后山隧道做为运渣车辆的运输通道，经过长期通行使用，隧道监测未出现明显沉降，可以证明该方法穿越岩溶是安全有效的，小断面油气管线隧道遇到此岩溶类型的处理中可以进行借鉴和推广。

参考文献

[1] 陈军. 岩溶地区隧道穿越大型溶洞施工技术研究与应用[J]. 交通世界,2025(15):136-138. DOI:10.3969/j.issn.1006-8872(s).2025.15.044.

[2] 李战军,刘玲平,郑炳旭. 岩溶区河流下小断面隧道施工[J]. 隧道建设,2007,27(1):58-61. DOI:10.3969/j.issn.1672-741X.2007.01.015.

[3] 甘强. 隧道穿越大型溶洞处治技术研究[J]. 西部交通科技,2024(8):149-151. DOI:10.13282/j.cnki.wccst.2024.08.047.

[4] 陈小明,张理轻,潘婷,等. 深埋隧道底部溶腔对围岩塑性区影响分析[J]. 中国水运,2025(19):143-146. DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2025.19.045.