铁溪隧道穿越煤系地层采空区施工关键技术

武瑞琪

（四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司，四川 成都 610200）

摘 要 铁溪隧道两段下穿罗村煤矿K1煤层采空区，稳定性差，伴生老窑积水和瓦斯，易塌方冒顶、涌突水和基础落空。本文以该隧道为依托，依据勘察资料，以测试与数值模拟分析围岩稳定性，实测洞内位移及钢拱架、初支、二衬内力；以注浆充填空洞并经钻探、物探评定效果，老窑积水按“探放结合、防排并重”超前探放、排水降压、注浆堵水；比选开挖与支护控制变形，以三维激光扫描监测沉降、收敛、水位，形成成套技术。

关键词 煤系地层；煤层采空区；老窑积水；注浆加固；铁溪隧道

中图分类号：U455 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.016

0 引言

采空区是煤层采出后遗留的空洞和破碎岩体，常伴生冒落、导水裂隙和老窑积水，下穿时易冒顶、落空、涌突水；煤系地层还具有煤层多、瓦斯高、富水软弱、初支变形大等特点。铁溪隧道两段下穿罗村煤矿K1煤层采空区，稳定性差。本文围绕围岩稳定性测试、采空区与积水处置、开挖支护和监测开展研究，总结其穿越煤系地层采空区施工关键技术，旨在为保障安全施工提供借鉴。

1 案例工程概况

1.1 铁溪隧道采空区分布与工程地质条件

镇巴至广安高速公路川陕界至王坪段铁溪隧道穿越罗村煤矿采空区。根据《镇巴至广安高速公路川陕界至王坪段施工图勘察设计采空区专项勘察报告》，隧道在平面上于里程K38+760～K38+830段和K39+600～K40+060段与采空区相交，采空区冒落带和导水裂隙带最大高度为35.01 m，据此圈定采空区移动变形影响区、冒落带和导水裂隙带范围。

K38+760～K38+830段穿过罗村煤矿（东南部）K1煤层采空区，煤层埋深20 m～200 m、标高710 m～760 m，隧道位于采空区下方10 m，稳定性综合评价为不稳定；K39+600～K40+060段穿过罗村煤矿（中部）K1煤层采空区，煤层埋深33 m～146 m、标高725 m～980 m，隧道位于采空区下方45 m，稳定性综合评价同样为不稳定。由于煤矿开采时间长，地表调查发现多处废弃矿洞存在地下水外溢；煤矿开采属暗部工程，采空区空间位置存在不确定性，隧道下穿时可能发生涌突水、突泥。

1.2 施工难点

煤系地层公路隧道施工面临的主要问题集中在防突、防爆、保持巷道稳定和采空区综合治理四个方面，即防止煤与瓦斯突出和瓦斯燃烧爆炸、控制围岩大变形、防止塌方冒顶和结构基础落空。结合铁溪隧道采空区现状，施工难点主要有三个方面：一是两处采空区均评价为不稳定，隧道分别从采空区下方10 m和45 m通过，围岩受采动影响破碎、自稳能力差；二是煤系地层煤层数多、厚度不等、倾角陡缓不一，瓦斯含量高且浓度、压力变化不定；三是富水软弱煤系地层初期支护变形大、开挖易塌方，废弃矿洞和老窑积水使涌突水、突泥风险叠加。

2 煤系地层采空区围岩稳定性分析与现场测试

2.1 煤系地层工程地质特征与采空区“三带”划分

煤系地层是在含煤岩系中形成的层状岩体，铁溪隧道穿越段以K1煤层及其顶底板泥岩、砂岩为主。受沉积环境和构造作用影响，该类地层具有四个特点：一是煤层层数多、厚度不等、倾角陡缓不一、规模不一；二是瓦斯含量高，浓度和压力变化不定；三是富水软弱地层初期支护变形大、开挖易塌方；四是多有采煤活动，采空区影响规模和程度直接关系到施工安全与经济性[1]。

煤层采出后，上覆岩层失去支撑并逐步形成垮落断裂带。依据专项勘察报告，结合采深、采厚、岩性和开采方式对采空区上覆岩层分带，确定冒落带、导

作者简介：武瑞琪（1997-），男，本科，助理工程师，研究方向：公路施工技术质量管理。

水裂隙带和移动变形影响区。勘察表明两处采空区冒落带和导水裂隙带最大高度为 35.01 m，隧道与采空区之间岩柱厚度分别约 10 m 和 45 m，东南部段岩柱已处于导水裂隙影响范围内。明确岩性组合和“三带”空间位置，是评价围岩稳定性和确定处治范围的基础。

2.2 采空区围岩稳定性评价

采空区围岩稳定性评价采用资料分析、工程地质调查和钻探物探相结合的方式。专项勘察报告对两处 K1 煤层采空区均给出不稳定结论，主要依据是空洞和冒落岩体尚未完全压密，残余裂隙发育、岩体破碎，在开挖扰动和地下水作用下可能进一步变形。对隧道位于采空区下方 10 m 的 K38+760 ～ K38+830 段，岩柱薄、距冒落带近，爆破开挖易引起上方破碎岩体二次失稳，造成塌穿和落石；对位于采空区下方 45 m 的 K39+600 ～ K40+060 段，虽岩柱相对较厚，但段落长、采空区规模和位置不确定，仍需防范不均匀沉降和突水。

在“三带”范围内分析残余变形对结构的影响：对影响区内空洞和松散体以充填加固恢复连续性；对导水裂隙带和老窑积水以封堵通道、超前排水降低水头为主[2]。把稳定性评价结果与处治范围、支护参数对应，使不同稳定状态的采空区段采取差别化措施，避免处治不足或盲目扩大加固范围。

2.3 围岩与支护结构现场测试

掌握煤系地层围岩和支护结构实际受力变形，是确定开挖支护参数的依据。课题一对铁溪隧道煤系地层段开展系统现场测试，实测洞内位移、钢拱架内力、初期支护混凝土内力和二次衬砌内力并整理分析。洞内位移以周边收敛和拱顶下沉为主，反映围岩开挖后的变形速率和收敛过程；钢拱架、初期支护混凝土和二次衬砌内力通过预埋量测元件获取，反映支护承载过程和荷载分担情况。

对比不同开挖步距和工艺下初期支护变形、内力分布及变化特点，分析不同类型煤系地层下围岩变形破坏特征和初期支护变形、内力分布。当变形速率快、钢拱架和喷层内力增长迅速时，缩短进尺、及时封闭支护；变形收敛、内力稳定后再施作二次衬砌。依据测试结果评价施工期围岩稳定性和初期支护安全性，并把反馈用于调整超前支护、初期支护和二次衬砌参数，形成量测、判识、调整闭环。

2.4 开挖过程围岩稳定性数值模拟

在现场测试基础上，借助数值模拟分析煤系地层隧道开挖引起的围岩变形、塑性区和支护结构变形、内力。依据洞内位移和初期支护内力动态变化评判围岩稳定性，再以数值计算再现不同开挖方法和支护条件下的应力释放过程，弥补现场测试点有限、难以覆盖全部采空区段的不足。

数值模型按岩层组合、采空区位置和“三带”范围建立，分别模拟隧道从采空区下方 10 m 和 45 m 通过时应力重分布、塑性区扩展和支护受力，重点考察薄岩柱段上方冒落岩体是否随变形向下扩展，以及积水水头对衬砌的作用。在此基础上对比不同开挖方法的应力释放过程和程度、不同支护方式对应力的控制效果，分析各工况力学响应，优选开挖方法和支护措施。模拟结果与现场实测相互校核，当计算变形、内力与实测规律一致时，才将相应开挖步距和支护参数用于施工，在穿越采空区前对变形和风险作出预判。

3 采空区及老窑积水处置与开挖支护关键技术

3.1 采空区注浆加固处置技术

注浆加固是采空区治理的主要手段。课题二针对采空区空洞和冒落破碎岩体，研究注浆材料与注浆工艺对处置效果的影响，通过向采空区及裂隙带压注浆液，充填空洞、胶结破碎岩体、封堵导水通道，使隧道上方和周边松散岩体重新形成具有承载能力的整体。施工以地质预报为基础，先依据勘察和物探成果圈定采空区平面位置和竖向范围，再按埋深、空隙大小和富水情况选择注浆材料和工艺：对空洞大、地下水活跃部位采用凝结时间可调的浆材，控制浆液扩散和凝结范围；对一般破碎带以充填固结为主[3]。

注浆效果采用钻探取样和物探检测相结合评定：在注浆区布置检查孔，通过岩芯采取情况判断空洞充填和胶结程度，同时用物探检测注浆前后波速和异常区变化，对未充填密实或仍存在渗水通道的部位补注浆。注浆加固与结构支护相配合，对隧道底部和外侧可能落空部位先行处理再开挖，防止基础落空。

3.2 老窑积水“探放结合、防排并重”处置技术

老窑积水是铁溪隧道穿越采空区的突出水害。多处废弃矿洞地下水外溢，而老窑开采属暗部工程，积水范围、水深和水压难以仅凭地表调查确定。课题二采用物探技术识别并经钻探验证，确定老窑积水区域及积水深度与压力，为排水和堵水提供依据。

在探明积水区基础上研究排水降压和注浆堵水技术。对前方老窑积水坚持超前探放，利用超前钻孔提前将积水有序引出、降低水头压力，避免高水头水体

在开挖时突然溃入；对探放后仍存在的导水裂隙和散状渗水采用注浆封堵，在隧道周边形成阻水固结圈。通过超前探测、注浆封堵和排水系统建设，形成针对老窑积水“探放结合、防排并重”的综合处置措施，先探后掘、先放后掘，把集中积水转化为可控排水，把残余渗水通过注浆和防排水系统有序引排。处置中同步观测钻孔涌水量、水压和水位，确认水压降至安全范围、掌子面涌水量可控后再逐步开挖[4]。

3.3 穿越采空区开挖方法与支护技术

针对穿越煤系地层采空区及老窑积水段，研究合理开挖方法和支护措施。通过对比不同开挖方法下应力释放的过程和程度、不同支护方式对应力的控制效果，确定与采空区段相适应的开挖方法、循环进尺和支护形式，控制隧道变形。

开挖遵循短进尺、弱扰动、早封闭原则，在薄岩柱和采空区影响段缩短循环进尺、减小爆破对上方破碎岩体的扰动，开挖后及时施作初期支护并尽早封闭成环，使支护与围岩共同承载；对可能落空和塌方冒顶部位，采用超前支护预先托住顶部岩体，配合注浆加固形成承载壳后再开挖。针对防突、防爆要求，结合揭煤防突经验，施工中加强瓦斯监测和通风、控制瓦斯浓度，电气设备按防爆要求管理，必要时采用气密性混凝土阻隔瓦斯[5]。对富水软弱、初期支护变形较大的地段，按测试和模拟结果加强初期支护、合理确定二次衬砌时间，并对基础可能落空部位换填或注浆处理。

3.4 基于三维激光扫描的施工监测技术

针对穿越煤系地层采空区及老窑积水段构建施工监测技术。研究采用非接触式高速激光测量，对隧道结构和岩土信息进行高分辨、大面积扫描，实现采集空间点位信息的三维成像，以三维激光扫描仪替代传统测量进行安全监控，提高施工精度和安全等级[6]。

结合采空区和老窑积水工程特性，监测以地表沉降、围岩收敛、水位动态等为关键指标：地表沉降反映采空区残余变形和注浆处治效果，围岩收敛反映洞内开挖后稳定状态，水位动态和钻孔涌水量反映老窑积水降压、堵水情况。三维激光扫描可快速获取断面和地表点云，经多期点云对比得到沉降和收敛分布，弥补接触式量测在易塌方段布点困难、频次不足的问题[7]。研究据此构建基于三维激光扫描的监测方案，并与洞内位移、钢拱架和衬砌内力等接触式量测相互印证，形成空区变形、结构受力和地下水三位一体的监测反馈，及时指导开挖步距、支护参数及排水注浆措施调整。

4 铁溪隧道穿越煤系地层采空区施工效果分析

从应用安排看，K38+760～K38+830段隧道位于采空区下方仅10 m、岩柱薄，以超前探测、注浆加固充填空洞、超前支护和严控开挖进尺为主；K39+600～K40+060段位于采空区下方45 m、段落较长，以物探钻探查明采空区和老窑积水、排水降压配合注浆堵水、加强支护和监测为主。两处采空区均按“先探明、再处治、后开挖、勤监测”顺序组织，注浆效果经钻探取样和物探检测确认，老窑积水经探放和封堵确认水压、涌水量受控，开挖支护参数由现场测试和数值模拟共同确定，施工过程以三维激光扫描和常规量测持续反馈。

5 结束语

依托铁溪隧道，针对两段下穿罗村煤矿K1煤层、稳定性均为不稳定的采空区，形成围岩稳定性测试、采空区与积水处置、开挖支护和激光监测成套技术。以实测和数值模拟掌握围岩与支护变形规律；以注浆充填空洞并经钻探物探评定效果，按“探放结合、防排并重”处置老窑积水；通过比选开挖与支护控制应力释放和变形，并以激光扫描监测沉降、收敛和水位。随着物探与数字孪生发展，未来需完善采空区精细探测、注浆智能评价和风险预警。

参考文献：

[1] 李怀友,李献民,孙新海,等.山区隧道穿越煤系地层开挖方法适用性数值分析[J].施工技术(中英文),2025,54(24):17-22.

[2] 姬良满.三维激光扫描技术在矿山复杂采空区探测与建模中的应用[J].中国高新科技,2025(18):103-105.

[3] 刘震宇,唐彬,胡阳,等.煤矿深部复合地层TBM掘进巷道围岩稳定性控制工程实践[J].科技资讯,2024,22(16):191-196.

[4] 王静.隧道穿越倾斜煤系地层围岩变形及受力规律研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2023,25(04):102-106.

[5] 冯兴亮,曹小亮.某高速公路采空区稳定性综合评价及治理方案研究[J].公路,2022,67(10):126-130.

[6] 李怀友,李献民,孙新海,等.山区隧道穿越煤系地层开挖方法适用性数值分析[J].施工技术(中英文),2025,54(24):17-22.

[7] 颜杜民.穿越弃碴体地层浅埋隧道暗挖法施工关键技术研究[J].建筑技术,2025,56(21):2646-2650.