

Research and Application of Advanced Geological Prediction Technology for Open TBM Construction Tunnel

Wenfei Wang

China Railway Tunnel Survey and Design Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511458, China

Abstract

In order to solve the problem that the TBM machine in the Gaoligongshan Tunnel of the Dali—Ruili Railway has poor adaptability to adverse geological conditions such as mylonization and rich water in the granite stratum, the TBM hard rock roadheader has been stuck and stopped many times. Through the practice, research and analysis of advanced geological forecasting work, the following advanced geological forecasting working mechanisms have been established: ① TSP is used for long-distance physical detection; ② Physical property indicators are established to classify the forecast results and tunneling parameters into risk levels; ③ Carry out advanced drilling verification according to the risk level and on-site geological conditions; this mechanism makes up for the defect that TBM physical detection methods are rarely used, effectively reduces the risk of TBM jamming, reduces the impact on construction to a certain extent, and can be used for TBM construction. It provides the basis for the formulation of the tunnel scheme and the change of the surrounding rock design.

Keywords

TBM construction; TSP detection; risk level; advanced drilling verification

敞开式 TBM 施工隧道超前地质预报技术研究与应 用

王文飞

中铁隧道勘察设计研究院有限公司, 中国·广东 广州 511458

摘 要

为了解决大理—瑞丽铁路高黎贡山隧道TBM机械对花岗岩地层糜棱化、富水等不良地质条件适应性差,导致TBM硬岩掘进机出现多次卡机停工的问题。通过对超前地质预报工作实践、研究分析,建立了以下超前地质预报工作机制:①采用TSP进行长距离物理探测;②建立物性指标将预报结果、掘进参数进行风险等级划分;③根据风险等级以及现场地质情况进行超前钻孔验证;此机制弥补了TBM物理探测手段应用少的缺陷,有效地降低了TBM卡机风险,一定程度上减少了对施工的影响,可为TBM施工隧道方案的制订及围岩设计的变更提供依据。

关键词

TBM施工; TSP探测; 风险等级; 超前钻孔验证

1 引言

TBM 施工方法具有“掘进速度快,施工扰动小、成洞质量高、综合经济效益高”等优势^[1],同时硬岩掘进机施工方法也有其特殊性和复杂性。据统计,在 TBM 掘进的灾害事故中,突涌水灾害占 35%,塌方灾害、大变形占 37%^[2],由此看来 TBM 施工环境中做好超前地质预报工作尤其重要。由于敞开式 TBM 独特的空间结构以及复杂的电磁环境,很多传统的超前地质预报手段存在无法应用、效果差的问题。地震反射法首先被引入 TBM 环境的超前探测领域,随后 G. Kneib 等将随钻地震探测技术引入 TBM 自动探测,德国 GFZ 研发了 ISIS 主动源地震超

前探测技术^[3],但效果都不理想。国内对 TBM 超前地质预报研究起步稍晚,物理探测手段方面上李术才等研发了 TBM 搭载的激发极化法,中铁西南院研制了 HSP 声波法等,尚处于试验阶段,钻探方面上搭载于 TBM 上的钻机系统灵活性差,无法实现多角度、多位置探测,对施工影响较大。

同时综合探测和联合解译的思想与技术也处于初级发展阶段,刘斌等提出了一套以地球物理超前地质预报和基于“岩—机关系”预测岩体主要参数的解决方法^[4]。

总而言之,针对 TBM 超前地质预报目前的现状,需要建立一个地质预报工作机制,即调整传统的预报手段,充分利用预报结果和掘进参数对前方地质译析分析,同时增加钻探技术进一步对前方围岩情况直观确认,为 TBM 设备保驾护航。

【作者简介】王文飞(1990—),男,中国甘肃民乐人,本科,助理工程师,从事隧道与地下工程研究。

2 工程背景

2.1 工程概况

高黎贡山隧道全长 34.538km, 设计时速 140km/h, 其中 TBM 施工段长 22.070km, 占高黎贡山隧道全长的 63.90%, 施工内容包括 I 线正洞工程 12.070km; 平导工程 10.000km。

设计上高黎贡山隧道 TBM 施工段围岩长度为: II 级围岩 2040m, 占 16.9%; III 级围岩 5230m, 占 43.33%, IV 级围岩 3620m, 占 29.99%; V 级围岩 1180m, 占 9.78%, II、III 级围岩占比较大, 然而实际掘进过程中揭示围岩比设计情况差, IV、V 级围岩比重明显增加, II、III 级围岩比重明显减小。另一方面, TBM 机械系统本身对 IV、V 级围岩尤其是不良工程地质条件适应性差, 在围岩破碎、糜棱化、出水等不良地质条件下掘进缓慢, 优势难以发挥, 更甚者容易造成卡机。

2.2 地质概况

高黎贡山隧道 TBM 段洞身主要穿越地层岩性为寒武系公养河群二段 (∈ gn(2)) 片岩、板岩、千枚岩夹石英岩、变质砂岩; 志留系中上统 (S[2~3]) 灰岩、白云岩夹砂岩; 泥盆系中统回贤组 (D[2] h) 白云岩、灰岩夹石英砂岩。段内发育栗栗田断层、塘房断层、老董坡断层、广林坡断层、凹子地断层共 5 条断层, 穿越 2 段可溶岩地层。地下水以大气降雨补给为主, 局部受地表水体补给, 地表水受降雨控制明显, 雨季流量大, 枯水季节水量小, 预测最大涌水量为 $4.15 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

3 超前预报工作机制

3.1 工作流程

每一预报循环内通过 TSP303 系统对掌子面前方进行长距离物理探测, 采集的数据利用 Amberg TSP Plus 软件进行处理获得隧道掌子面前方的 P 波、SH 波和 SV 波的时间剖面、深度偏移剖面、岩石的反射层位、物理力学参数、各反射层能量大小等中间成果资料, 建立物性指标对预报成果、掘进参数进行风险等级划分为 I 级风险 (突水涌泥)、II 级风险 (局部破碎, 易坍塌掉块) 和 III 级风险 (风化程度一般, 节理裂隙发育一般)。当预报风险等级为 I 级风险时采用超前钻孔验证; II 级风险时控制掘进参数、观察围岩变化对施工的影响大小; III 级风险时则正常掘进。

TBM 段超前地质预报工作流程图见图 1。

3.2 物性指标

TSP 探测是一种长距离的超前地质预报方法, 可提供掌子面前方大量的围岩特性参数^[5]。利用 TSP 这一特性以及有效的 TBM 掘进参数, 在综合考虑 TSP303 系统、隧道围岩稳定性影响因素和掘进参数的基础上, 选取岩体纵波波速、泊松比、岩体完整程度、不连续结构面状态、地下水情况、掘进参数等 6 个指标进行围岩风险等级划分。通过试验、

前期经验的积累总结中发现, 6 个指标中当满足 4 个级及以上时, 即可定义为该风险等级 (见表 1)。

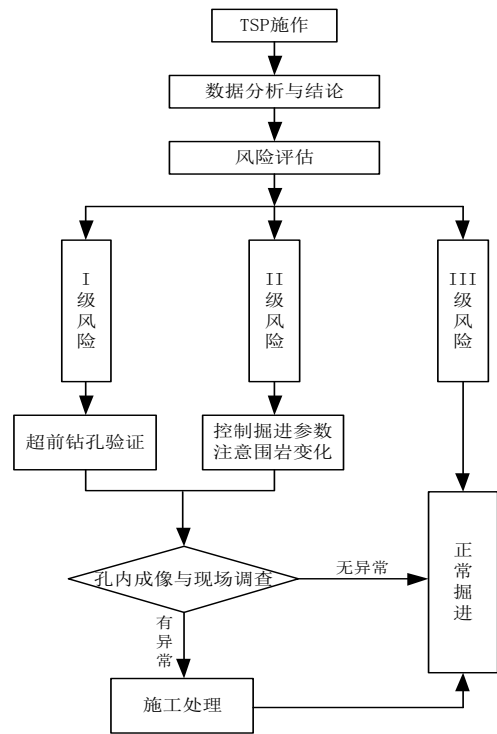


图 1 TBM 段超前地质预报工作流程图

表 1 风险等级表

风险	预报结果					掘进参数
	纵波波速	泊松比	岩体完整程度	不连续结构面	地下水	扭矩/推力
I 级风险	< 3.5	> 0.30	< 0.10	> 0.50	> 0.70	> 0.15
II 级风险	3.5~4.0	0.20~0.30	0.1~0.5	0.1~0.5	0.1~0.7	
III 级风险	> 4.0	< 0.20	> 0.5	< 0.10	< 0.10	< 0.15

注: ①纵波波速通过软件数据处理得出。②泊松比通过软件数据处理得出。③岩体完整程度通过 TSP 探测成果的深度偏移图、反射层提取图、物性参数图和二维成果图综合评价得出。I. 反射界面少, 取值 > 0.5; II. 反射界面较多, 取值 0.1~0.5; III. 反射界面多且杂, 取值 < 0.10。④地下水发育情况根据 TSP 成果图特征人为量化。I. 未体现含水特征, 取值 < 0.10; II. S 波反射比 P 波强, 取值 0.1~0.7; III. S 波反射强, 条带宽, 取值 > 0.70。⑤不连续结构面状态采用 P 波负反射相对强弱进行处理。I. P 波反射不明显, 取值 < 0.10; II. P 波反射较强烈, 取值 0.1~0.5; III. P 波反射强烈, 取值 > 0.50。⑥对 TBM 掘进参数分析, 当扭矩/推力连续 > 0.15 时, 前方围岩有可能出现坍塌。

4 预报技术

4.1 TSP 探测

4.1.1 工作原理

在隧道掌子面附近边墙一定范围内布置激发孔, 通过在孔中人工激发地震波, 所产生的地震波以球面波的形式在隧道围岩中传播, 当围岩波阻抗发生变化时 (例如遇岩溶、断层或岩层的分界面), 一部分地震波将会被反射回来, 另一部分地震波将会继续向前传播。反射的地震波由高精度的接收器所接收并传递到主机形成地震波记录。

4.1.2 测线布置

在敞开式 TBM 施工段裸露围岩处利用风钻施作 2 个接收器孔和 24 个激发孔, 接收器孔垂直隧道边墙, 向上倾斜 $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$, 孔深约 2m, 直径约 $\Phi 50\text{mm}$, 距地面 (隧底) 高约 0.5m; 在位于构造走向与隧道轴向交角为锐角的一侧边墙施作第 1 个炮孔, 距 TBM 段掌子面约 5~8m, 间距约 1.2m。测线布置情况见图 2。

4.1.3 数据采集与分析

TSP 超前地质预报系统分为洞内数据采集和室内分析处理两部分, 洞内数据采集包括打接收器孔和爆破孔、埋置接收器管、连接接收信号仪器、放炮接收信号等过程。根据围岩软硬完整破碎程度与距接收器位置的远近而不同, 确定每爆破孔装药量, 放炮接收信号过程中以防孔内爆破带来的水、岩渣污染或损坏设备, 可在孔口处放置防护板; 对 TSP303 Plus 仪器采集的数据利用 Amberg TSP Plus 软件进行处理, 可以获得隧道掌子面前方的 P 波、SH 波和 SV 波的时间剖面、深度偏移剖面、岩石的反射层位、物理力学参数、各反射层能量大小等中间成果资料, 同时还可得到反射层的二维和三维空间分布, 从而达到对隧道掌子面前方的预测, 为正洞的开挖提供保障。

4.2 超前钻孔

超前地质钻孔是对 TSP 预报探测到的不良地质体的确认。超前钻机系统装置于 TBM 硬岩掘进机上, 同时为了保证钻孔布孔的灵活性以及尽可能减少对施工的影响, 实际施

作过程中根据 TBM 空间, 配备一台可移动的潜孔型钻机。超前地质钻孔的位置、孔深、数量等由地质人员根据物探预报成果并结合掌子面附近的地质情况综合分析确定。

在断层带、物探预报异常段设置超前水平钻孔, 钻进深度 20~60m, 辅以孔内成像系统直接观察孔壁围岩情况。当异常段距离过长, 超前地质钻孔采用连续搭接进行, 循环预报搭接长度以不少于 5m 岩盘为宜, 来探明前方地层完整性、断层以及地下水发育情况 (水量、水压、水温、悬浮物等)。

5 工程应用

5.1 TSP 工作概况

在高黎贡山隧道 I 线正洞工程进行 TSP 探测, 设计显示该段洞身主要穿越燕山期花岗岩地层, 围岩级别为 IV 级。现场布置 24 个炮孔, 2 个接收器同时接收, 接收器位置在 D1K224+282, 掌子面位置为 D1K224+218, 2 个接收器孔和 24 个炮孔孔位、角度以及间距严格按照技术交底布置, 通过试验, 确定采用药量为 50~100g 乳化炸药, 响炮时炮孔口处用防护板保护 TBM 设备, 现场数据采集质量良好。

5.2 数据分析与结论

5.2.1 数据分析

根据 TSP 法的原理和工作经验, 把距离隧道轴线近、能量大的反射波组判释为围岩异常区, 并综合地震波速、反射波相位、泊松比和动态杨氏模量等参数对围岩异常区的类别进行划分。解释原则如下所述:

- ① 泊松比高说明有流体存在, 纵波波速低说明有裂隙存在;
- ② S 波反射能量强, P 波反射能量弱, 说明有流体存在;
- ③ S 波反射能量弱, P 波反射能量强, 说明有裂隙存在;
- ④ 反射波为正相位时, 说明围岩由软弱岩层进入坚硬岩层;
- ⑤ 反射波为负相位时, 说明围岩由坚硬岩层进入软弱岩层;
- ⑥ 当泊松比大于 0.28 或 VP/VS 突然增大时, 前方地质情况为有水或围岩较破碎;

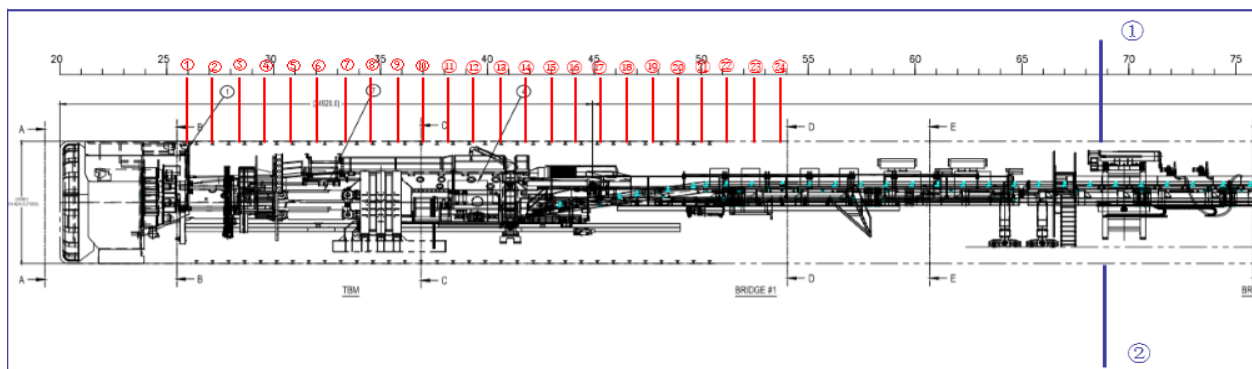


图 2 测线布置示意图

⑦当静态杨氏模量大于 30 时，石质坚硬，反之，石质较软；

⑧当反射界面较多且静态杨氏模量和泊松比变化频繁，幅度较大时，围岩为破碎带，若为负反射振幅时，围岩为软弱破碎带。

5.2.2 TSP 结论

里 程 D1K224+218~D1K224+192，D1K224+182 附近，D1K224+172~D1K224+162 区段节理裂隙发育，围岩强度较低，岩体较破碎，自稳能力较差；D1K224+211~D1K224+203、D1K224+192、D1K224+173、D1K224+163、D1K224+155 区域附近发育地下水。具体情况见表 2。

TSP 物理力学参数成果图见图 3。

5.3 风险评估

将本次 TSP 探测结论进行研究分级。从 TSP 结

论判释表中可以得出，三段探测结果存在差异性，即 D1K224+218~D1K224+192、D1K224+172~D1K224+162 和 D1K224+140~D1K224+098。将预测或收集来的物性指标进行风险等级划分。

①纵波波速。

从 TSP 物理力学参数成图可以得出，D1K224+218~D1K224+192 段纵波波速为 2963~3487m/s；D1K224+172~D1K224+162 段纵波波速为 3492~3753m/s，D1K224+140~D1K224+098 段纵波波速为 3504~3704m/s。

②泊松比。

从 TSP 物理力学参数成图可以得出，D1K224+218~D1K224+192 段 泊 松 比 为 0.08~0.23，D1K224+172~D1K224+162 段泊松比为 0.25~0.27，D1K224+140~D1K224+098 段泊松比为 0.29~0.28。

表 2 TSP 结论判释表

序号	里程	长度（m）	探测结果推断	建议采用措施
1	D1K224+218 ~ D1K224+181	37	该段围岩完整性差，其中：D1K224+218~+192 段节理裂隙发育，岩质软，易坍塌掉块；D1K224+211~+203、+192 区域附近发育地下水	采用钻探验证围岩含水情况 & 围岩破碎情况
2	D1K224+181 ~ D1K224+140	41	该段围岩较完整，其中：D1K224+182 附近，D1K224+172~+162 段节理裂隙较发育，岩体较破碎，局部易掉块；D1K224+173、+163、+155 附近发育地下水	控制掘进参数，注意围岩变化
3	D1K224+140 ~ D1K224+098	42	该段围岩较完整，节理裂隙发育较发育，围岩整体波速较低，强度相对较差，地下水弱发育	/

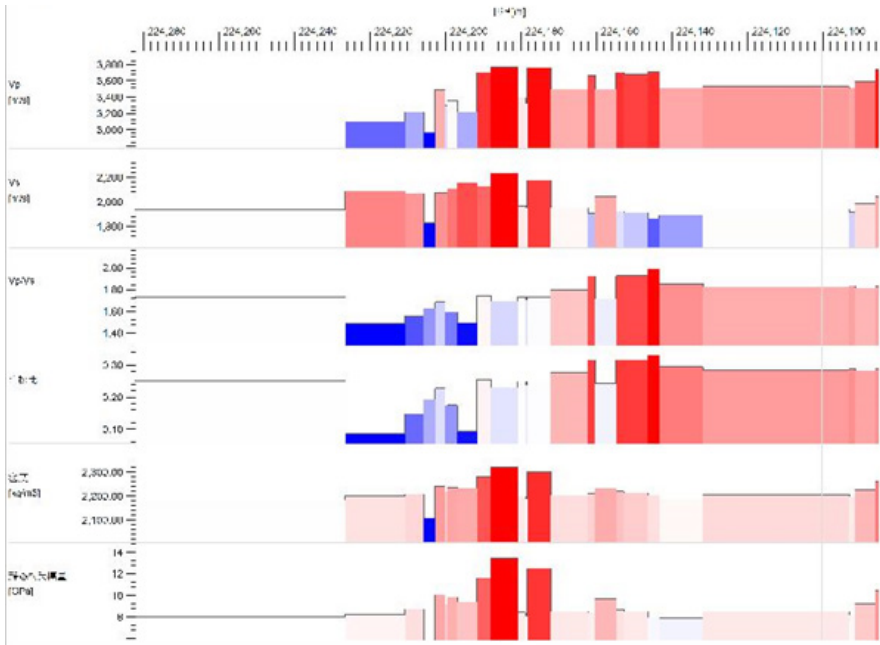


图 3 TSP 物理力学参数成果图

③岩体完整程度。

岩体完整程度根据反射界面的多少划分。由反射界面二维图可得, D1K224+218~D1K224+192 段反射界面多且杂, 取值 < 0.10 ; D1K224+172~D1K224+162 段反射界面较多, 取值 $0.1\sim 0.5$; D1K224+140~D1K224+098 段反射界面少, 取值 > 0.5 。

④不连续结构面。

不连续结构面状态采用 P 波负反射相对强弱进行处理。由 P 波深度偏移图可得, D1K224+218~D1K224+192 段 P 波反射强烈, 取值取值 > 0.50 ; D1K224+172~D1K224+162 段 P 波反射不强烈, 取值 < 0.10 ; D1K224+140~D1K224+098 段 P 波反射较强烈, 取值 $0.1\sim 0.5$ 。

⑤地下水。

TSP 只能定性预测地下水, 不能定量预测地下水含水量多少。由波速云图得出, D1K224+218~D1K224+192 段 S 波反射强, 且条带宽, 取值 > 0.70 ; D1K224+172~D1K224+162 段 S 波反射比 P 波强, 取值 $0.1\sim 0.7$, D1K224+140~D1K224+098 段未体现含水特征, 取值 < 0.10 。

⑥扭矩 / 推力。

由扭矩 / 推力统计图可得, D1K224+172~D1K224+162 段扭矩、推力比值大部分大于 0.15 ; D1K224+140~+098 段扭矩、推力比值一小部分大于 0.15 ; D1K224+140~D1K224+098 段扭矩、推力比值小于 0.15 。

5.4 超前钻孔验证

5.4.1 超前钻孔施作

在高黎贡山隧道 I 线正洞工程里程 D1K224+215.7 左下, 采用潜孔钻机进行超前钻孔作业。钻孔深度约 33m , 偏角为 16° , 钻孔结论如下:

本次超前水平钻孔共施做 33m , 根据钻进速率、返碴、返水情况判定: D1K224+215.7~+187.1 段岩性为花岗岩, 岩体较破碎~破碎; 其中, D1K224+215.7~+208.8、D1K224+196.6~+192.3 段围岩完整性较差, 岩体破碎~较

破碎, 节理裂隙较发育~发育; D1K224+208.8~+196.6、D1K224+192.3~+187.1 段围岩完整性差, 岩质稍软, 岩体破碎, 节理裂隙发育, 局部发育软弱夹层, 含充填物。整段地下水较发育, 终孔水量约为 $7\text{m}^3/\text{h}$, 推测该段主要发育为滴水成线或滴渗水, 局部小股状出水。

5.4.2 孔内成像

采用孔内成像设备对超前水平钻孔孔内情况进行观察, 能为掌子面前方围岩的观察起到了良好的辅助作用, 通过对孔内孔壁、孔型、裂隙、出水等情况进行观察, 达到较直观地判断围岩情况。

孔内成像揭示 D1K224+213.8 处出现塌孔现象, 孔内揭示出水量较大, 与 TSP 预报结论吻合。实际开挖揭示中国岩风化程度高, 呈松散状, 难以自稳, 属 I 级风险。

6 结论

① TSP 探测 + 超前钻孔验证模式无缝适应敞开式 TBM 掘进机独特的空间结构, 较其他传统的预报方式灵活性更强。

②根据 TSP 结果进行风险评估以及现场地质情况决定钻孔验证方式的工作流程, 有效地降低了卡机风险, 同时减少了对施工的影响。

参考文献

- [1] 张镜剑.隧道掘进机在我国应用的进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):226-238.
- [2] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
- [3] 李术才.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014(6):1090-1091.
- [4] 刘斌.TBM掘进前方不良地质与岩体参数的综合获取方法[J].山东大学学报,2016(6):105-112.
- [5] 邱道宏.基于TSP203系统和GA-SVM的围岩超前分类预测[J].岩石力学与工程学报,2010(29):6.