

文章编号: 1674—8247(2022)04—0125—06  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.04.021

## 高黎贡山隧道 TBM 卡机与物探、钻探成果耦合性浅析

陈 杰<sup>1</sup> 杜宇本<sup>2</sup> 蒋良文<sup>3</sup> 沈 维<sup>3</sup>

(1. 成都华丰工程勘察设计有限公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 611756;  
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘 要:**为解决极端复杂地质条件下隧道 TBM 卡机受困的问题,本文以大瑞铁路高黎贡山隧道为例,根据隧道出口工区 TBM 已施工段卡机里程统计,以及地表物探、深孔钻探成果预测的高风险卡机段落统计情况,采用分项对比分析及综合成果对比分析的方法,总结出综合成果耦合性分析结论,提出 TBM 法施工隧道工程地质勘察建议,结果表明:(1)地表物探、深孔钻探预测成果与实际卡机里程耦合率均为 50%,耦合率较低;(2)综合物探及钻探成果后,预测卡机高风险段落为 12 段,与实际卡机里程耦合率增加至 71%;(3)采用地质深孔钻探对地表物探法进行验证,并利用两种勘察方法成果进行综合分析评价,可有效地增加 TBM 卡机受困风险段落预测的准确性。本文研究成果可为 TBM 后续施工提供一定的指导意义。

**关键词:**高黎贡山隧道; TBM 卡机; 物探; 钻探; 耦合  
**中图分类号:**U455 **文献标志码:**A

### A Brief Analysis of Coupling of TBM Jamming and the Results of Geophysical Prospecting and Drilling in Gaoligongshan Tunnel

CHEN Jie<sup>1</sup> DU Yuben<sup>2</sup> JIANG Liangwen<sup>3</sup> SHEN Wei<sup>3</sup>

(1. Chengdu Huafeng Engineering Survey and Design Co., Ltd., Chengdu 610031, China;  
2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;  
3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The purpose of this paper is to solve the problem of TBM jamming in tunnels under extremely complex geological conditions. Based on the case study of the Gaoligongshan Tunnel of the Dali-Ruli Railway, this paper provides an itemized comparison and a comprehensive comparison of the statistical results of TBM jamming chainage in the constructed section of the tunnel exit area and the statistical results of the high-risk jamming section predicted by surface geophysical prospecting and deep borehole drilling results, summarizes the conclusions of the coupling analysis of the comprehensive results, and proposes recommendations for the engineering geological investigation of the tunnel constructed by the TBM method. The results show that: (1) The coupling rate between the predicted results of surface geophysical prospecting and deep hole drilling and the actual jamming chainage are all 50%, which is a low coupling rate. (2) After integrating the results of geophysical prospecting and drilling, the number of the predicted high-risk sections for jamming is 12, and the coupling rate with the actual jamming chainage increases to 71%. (3) The use of geological deep-hole drilling to verify the surface geophysical prospecting, and the use of the results of the two survey methods for comprehensive analysis and evaluation, can effectively increase the accuracy of the prediction of the sections

收稿日期:2021-06-03

作者简介:陈杰(1985-),男,工程师。

引文格式:陈杰,杜宇本,蒋良文,等. 高黎贡山隧道 TBM 卡机与物探、钻探成果耦合性浅析[J]. 高速铁路技术,2022,13(4):125-130.

CHEN Jie, DU Yuben, JIANG Liangwen, et al. A Brief Analysis of Coupling of TBM Jamming and the Results of Geophysical Prospecting and Drilling in Gaoligongshan Tunnel[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4):125-130.

with TBM jamming risk. The research results in this paper can provide guidance to some extent for the subsequent construction of TBM.

**Key words:** Gaoligongshan Tunnel; TBM jamming; geophysical prospecting; drilling; coupling

随着国家基础建设的快速发展和社会的进步,地下交通运输工程机械化施工也得到蓬勃发展<sup>[1-2]</sup>,作为国家的重要基础设施,铁路在中国综合交通运输体系中处于骨干地位<sup>[3]</sup>,而全断面岩石掘进机(Tunnel Boring Machine,简称TBM)凭借其安全性和高效性等特点,被广泛应用于铁路等长大深埋隧道施工中<sup>[4-6]</sup>。

大瑞铁路高黎贡山隧道出口工区施工段采用TBM法施工。为查明TBM施工段的地质条件,勘察期间采用遥感、地质调绘、物探、钻探、原位测试及室内试验等方法开展了综合地质勘察。然而,高黎贡山隧道地质条件极为复杂,TBM掘进过程中发生了多次卡机和受困,严重影响施工安全和工程进度,并造成严重的经济损失<sup>[7]</sup>。

本文拟从TBM施工卡机受困地质条件规律性总结,与勘察期间物探、钻探成果进行耦合性分析,利用综合分析成果结论,提出类似条件工况地质勘察建议,以指导设计和施工。

## 1 概况

### 1.1 工程概况

大瑞铁路高黎贡山隧道起讫里程为D1K 192 + 302 ~ D1K 226 + 840,全长34.538 km,洞内线路纵坡为“人”字坡,隧道进口线路高程为842 m,出口线路高程为1 215 m,最大埋深1 155 m。本隧采用“1平+1斜+2竖”的辅助坑道设置方案,平导位于预留Ⅱ线线位上,1号斜井长3 850 m,1号竖井深762 m,2号竖井深640 m,斜、竖井均设置为主副井。

结合本隧地质条件、洞口场地及交通条件,本隧进口、斜井、竖井工区采用钻爆法施工,长21.278 km。出口工区长13.26 km,正洞采用1台直径9.0 m开敞式TBM施工(全长12.546 km),平导采用1台直径6.36 m开敞式TBM施工(全长10.623 km)。高黎贡山隧道(按工区分段)线路布置如图1所示。

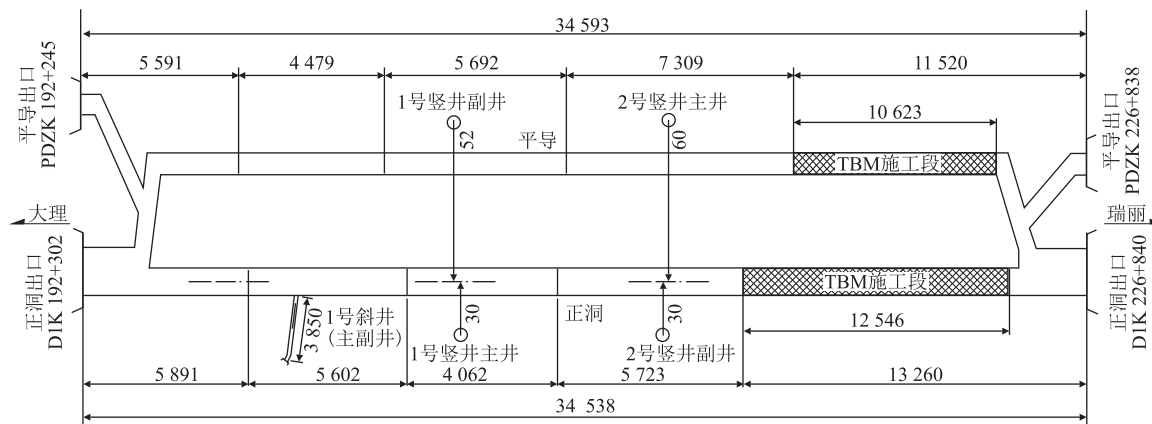


图1 高黎贡山隧道线路布置示意图(m)

### 1.2 地质概况

高黎贡山隧道位于怒江和龙川江间,穿越高黎贡山脉南段,山体浑厚,总体地势北东高南西低,山脉大体为南北走向,山脉、河流相间,地面高程640 ~ 2 340 m,相对高差约1 700 m,地形起伏大。

隧址区位于印度板块与欧亚板块相碰撞的缝合带附近,地处青藏高原巨形“歹”字型构造西支中段弧形构造带与经向构造带之“蜂腰部”南段。地质条件具“三高”(高地热、高地应力、高地震烈度)和“四活跃”(活跃的新构造运动、活跃的地热水环境、活跃的外动力地质条件和活跃的岸坡浅表改造过程)集于一体的

特征,工程地质条件极为复杂。

隧道出口TBM施工段发育泥盆系中统回贤组(D<sub>2</sub>h)白云岩、灰岩夹石英砂岩、志留系中上统(S<sub>2-3</sub>)灰岩、白云岩夹砂岩、寒武系公养河群二段(ε<sub>gn</sub><sup>2</sup>)片岩、板岩、千枚岩夹石英岩、变质砂岩、燕山期花岗岩(γ<sub>3</sub><sup>3</sup>)、断层破碎带(Fbr)、压碎岩(Crr)、蚀变岩(Sr)等地层,洞身围岩以花岗岩为主,次为砂岩、板岩、灰岩、断层角砾、蚀变岩;穿越栗栗田、塘房、老董坡、广林坡和凹子地断层5条断层。TBM施工段主要地质问题为破碎富水岩体围岩导致TBM受困卡机。隧道出口TBM施工段地质情况如图2所示。

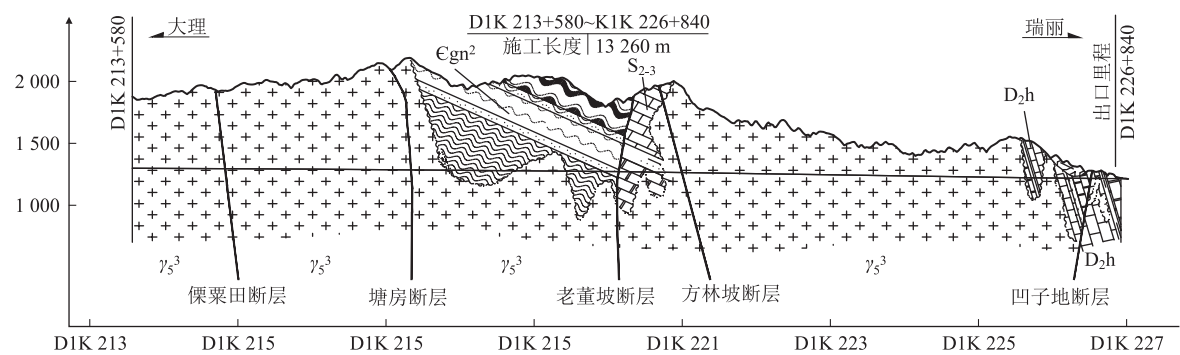


图2 高黎贡山隧道TBM施工段地质纵断面图

1.3 TBM卡机受困概况

高黎贡山隧道出口平导小TBM于2017年11月25日始发掘进;出口正洞大TBM于2018年2月1日始发掘进。高黎贡山隧道TBM施工段D1K 226 +

126 ~ D1K 219 + 631,长6.495 km,发生卡机受困10次;平导施工段PDK 225 + 943 ~ PDK 219 + 842,施工长度6.101 km,发生卡机受困14次。两段TBM施工段卡机受困情况如表1所示。

表1 TBM卡机受困情况统计表

序号	正洞大TBM卡机情况			平导小TBM卡机情况		
	卡机里程	围岩完整程度	地下水发育程度	卡机里程	围岩完整程度	地下水发育程度
1	D1K 226 + 014	较完整	涌流状	PDZK 225 + 287	破碎	淋雨状、线状
2	D1K 224 + 212	极破碎	局部滴状	PDZK 225 + 038	极破碎	局部滴状
3	D1K 223 + 537	破碎	潮湿	PDZK 224 + 313	极破碎	滴状、线状
4	D1K 223 + 342	极破碎	局部滴状	PDZK 224 + 224	极破碎	滴状、线状
5	D1K 221 + 547	极破碎	滴状、线状	PDZK 222 + 323	极破碎	股状
6	D1K 221 + 528	极破碎	滴状、线状	PDZK 222 + 272	破碎	涌流状、股状
7	D1K 221 + 369	破碎	局部滴状	PDZK 222 + 213	破碎	滴状、线状
8	D1K 220 + 983	较破碎	涌流状	PDZK 221 + 918	破碎	滴状、线状
9	D1K 220 + 521	极破碎	滴状、线状	PDZK 221 + 805	破碎	线状、小股状
10	D1K 220 + 244	极破碎	滴状、线状	PDZK 221 + 781	破碎	滴状、线状
11	-	-	-	PDZK 221 + 481	极破碎	涌流状
12	-	-	-	PDZK 220 + 415	破碎	滴状、线状
13	-	-	-	PDZK 220 + 252	极破碎	局部滴状
14	-	-	-	PDZK 219 + 842	破碎	滴状、线状

2 地面物探成果分析

高黎贡山隧道勘察期间采用可控源音频大地电磁测深法( Controlled Source Audio Magneto Telluric Method,简称CSAMT法),是在音频大地电磁测深(Audio Magneto Telluric Method,简称AMT法)基础上,发展起来的一种人工源频率测深方法<sup>[8]</sup>,全隧道贯通施作,物探点间距为20 m,共完成34.6 km。

2.1 物探成果特征

出口工区TBM施工段物探解译电阻率断面图如图3所示。

由图3可知,出口工区TBM施工段物探解译电阻

率断面图显示了以中阻为背景、分布有多条规模较大的条带状、串珠状和片状低阻异常的电性特征。在横向上,高低阻异常相间,中阻背景值为 $10^{2.4} \sim 10^{3.2} \Omega \cdot m$ 。物探解译结果表明隧道洞身范围存在上下基本贯通的条带状、团状或串珠状低阻异常,低阻异常的电阻率值均低于 $10^{2.2} \Omega \cdot m$ ,属高风险卡机段落。此外,局部段落洞身上部存在条带状及串珠状低阻异常,且异常区有垂直或斜向向隧道洞身延伸的趋势,洞身范围低阻异常的电阻率值分别为 $10^{2.6} \sim 10^{2.8} \Omega \cdot m$ 、 $10^{2.2} \sim 10^{2.4} \Omega \cdot m$ 和 $10^{2.6} \sim 10^{2.8} \Omega \cdot m$ 。

根据物探CSAMT法解译成果资料,以电阻率值为基础,对地表物探指标对TBM发生卡机概率进行分

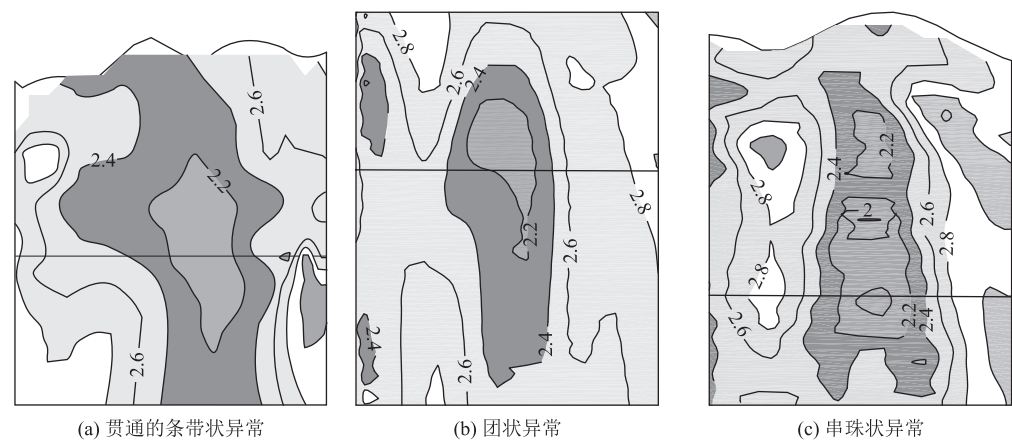


图3 物探解译电阻率断面图

类,结果如表2所示。

表2 地表物探电阻率值对应卡机概率分类表

电阻率值 /(Ω·m)	围岩等级	岩体破碎 程度	地下水发育 程度	卡机概率
<10 <sup>2.2</sup>	V级	破碎~极破碎	发育~极发育	极易卡机
10 <sup>2.2</sup> ~10 <sup>3.4</sup>	V级、IV级	较破碎~破碎	较发育~发育	易卡机
10 <sup>3.4</sup> ~10 <sup>3.8</sup>	IV级、Ⅲ级	较完整~较破碎	弱发育~较发育	不易卡机
>10 <sup>3.8</sup>	Ⅲ级、Ⅱ级	完整~较完整	不发育~弱发育	不卡机

需注意的是,CSAMT法资料仅是宏观评价高黎贡山隧道工程地质条件的基础,考虑到CSAMT法自身

存在静态效应、近场效应、场源效应、地形影响、高压输电线和日变磁场等会造成不可消除的干扰,从而导致CSAMT法资料的精度受到一定影响。因此,CSAMT可能漏判或误判部分不良地质体,现场开挖结果也表明CSAMT资料在不良地质段落存在一定范围里程差异。

2.2 物探成果分析

根据地表物探CSAMT法电阻率值解译结果,结合该物探方法存在一定差异性等特点,物探解译结果表明存在8段TBM卡机高风险段落,如表3所示。

表3 TBM已施工段物探预测卡机高风险段落表

序号	高风险卡机段落	主要岩性	主要地质情况	卡机地质特征
1	D1K 219 + 480 ~ D1K 219 + 660	花岗岩、变质砂岩	岩性接触带、蚀变带	岩体破碎、富水
2	D1K 220 + 380 ~ D1K 220 + 540	石英岩、花岗岩	岩性接触带、蚀变带	岩体破碎、富水
3	D1K 220 + 680 ~ D1K 221 + 050	石英岩、花岗岩	广林坡断层、岩性接触带、蚀变带	岩体极破碎、富水
4	D1K 221 + 910 ~ D1K 222 + 000	花岗岩	差异风化	岩体破碎
5	D1K 222 + 120 ~ D1K 222 + 380	花岗岩	构造影响破碎带、差异风化	岩体极破碎、富水
6	D1K 223 + 260 ~ D1K 223 + 360	花岗岩	差异风化	岩体破碎
7	D1K 224 + 160 ~ D1K 224 + 400	花岗岩	差异风化	岩体极破碎、富水
8	D1K 224 + 940 ~ D1K 225 + 060	花岗岩	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水

3 深孔钻探成果分析

考虑到高黎贡山较大隧道埋深和复杂地质条件,深孔钻探成孔及取芯难度极大,而绳索取芯技术钻进效率非常高、结构简单,采用该技术能够更好地保证岩芯质量,避免岩芯长时间浸泡,从而延长钻头的使用寿命,降低劳动强度<sup>[9]</sup>。高黎贡山隧道正线进、出口各施工1个水平向探孔,共完成勘探量425.9 m/2孔,共施工竖向深孔钻探32孔,完成勘探深度20 958.85 m,平均钻孔间距约1.01 km。其中,设计TBM施工段施工深孔钻探共13孔,完成勘探深度6 793.5 m,平均间距约1.02 km。

3.1 钻探成果特征

目前已施工段包含深孔钻探8孔,结果表明大部分段落以燕山期花岗岩(γ<sub>5</sub><sup>3</sup>)地层为主,差异风化较严重,其中C12Z-G-08号孔揭示志留系中上统(S<sub>2-3</sub>)地层,C12Z-G-12号孔及DZ-GLGS-19号孔揭示泥盆系中统回贤组(D<sub>2</sub>h)地层,存在主要地质问题为断层、构造影响破碎带、岩性接触带及蚀变带,如表4所示。

根据区域报告和勘测阶段地质调绘情况,推测老董坡断层与洞身相交于D1K 220 + 120附近,断裂附近岩体普遍破碎,糜棱岩、碎裂岩发育,且该断层属岩性接触断层,地下水发育,对隧道工程影响较大。

由C12Z-G-12号孔及DZ-GLGS-19号孔揭示的岩

性情况,推测 D1K 226 + 035 附近存在发育岩性接触带,为泥盆系中统回贤组(D2h)可溶岩地层与燕山期花岗岩( $\gamma_3^3$ )角度不整合接触,接触带附近岩体破碎,基岩裂隙水或岩溶水发育,围岩稳定性差,对隧道工程影响较大。

3.2 钻探成果分析

综合深孔钻探资料及区调情况分析,TBM 施工卡机高风险段落存在 7 段,具体情况如表 5 所示。

表 4 TBM 已施工段钻探揭示地质情况表

钻孔编号	主要岩性	地下水埋深/m	揭露主要地质情况	存在地质问题
C12Z-G-08	石英岩、花岗岩	39.1	广林坡断层、岩性接触带、蚀变带	岩体极破碎、富水
DZ-GLGS-16-1	花岗岩	30.2	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
C12Z-G-09	花岗岩	—	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
DZ-GLGS-18	花岗岩	22.28	差异风化	局部岩体破碎
C12Z-G-10	花岗岩	5.14	差异风化	局部岩体破碎
C12Z-G-11	花岗岩	7.4	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
C12Z-G-12	大理岩、花岗岩	5.14	岩性接触带	富水
DZ-GLGS-19	灰岩、石英砂岩	11.67	差异风化	局部岩体破碎

表 5 TBM 已施工段钻探预测卡机高风险段落表

序号	高风险卡机段落	主要岩性	主要地质情况	卡机地质特征
1	D1K 220 + 050 ~ D1K 220 + 200	变质砂岩、石英岩、花岗岩	老董坡断层、岩性接触带、蚀变带	岩体极破碎、富水
2	D1K 220 + 690 ~ D1K 221 + 050	石英岩、花岗岩	广林坡断层、岩性接触带、蚀变带	岩体极破碎、富水
3	D1K 221 + 580 ~ D1K 221 + 810	花岗岩	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
4	D1K 222 + 100 ~ D1K 222 + 350	花岗岩	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
5	D1K 224 + 910 ~ D1K 225 + 030	花岗岩	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
6	D1K 225 + 810 ~ D1K 225 + 860	大理岩、花岗岩	岩性接触带	富水
7	D1K 225 + 990 ~ D1K 226 + 040	花岗岩、灰岩、石英砂岩	岩性接触带	富水

4 综合成果分析

综合地表物探预测资料和深孔钻探成果划分高黎贡山隧道 TBM 施工卡机高风险段落,共 12 段,具体如表 6 所示。

表 6 TBM 已施工段卡机高风险段落统计表

序号	高风险卡机段落	主要岩性	主要地质情况	卡机地质特征
1	D1K 219 + 480 ~ D1K 219 + 660	花岗岩、变质砂岩	岩性接触带、蚀变带	岩体破碎、富水
2	D1K 220 + 050 ~ D1K 220 + 200	变质砂岩、石英岩、花岗岩	老董坡断层、岩性接触带、蚀变带	岩体极破碎、富水
3	D1K 220 + 380 ~ D1K 220 + 540	石英岩、花岗岩	岩性接触带、蚀变带	岩体破碎、富水
4	D1K 220 + 680 ~ D1K 221 + 050	石英岩、花岗岩	广林坡断层、岩性接触带、蚀变带	岩体极破碎、富水
5	D1K 221 + 580 ~ D1K 221 + 810	花岗岩	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
6	D1K 221 + 910 ~ D1K 222 + 000	花岗岩	差异风化	岩体破碎
7	D1K 222 + 100 ~ D1K 222 + 380	花岗岩	构造影响破碎带、差异风化	岩体极破碎、富水
8	D1K 223 + 260 ~ D1K 223 + 360	花岗岩	差异风化	岩体破碎
9	D1K 224 + 160 ~ D1K 224 + 400	花岗岩	差异风化	岩体极破碎、富水
10	D1K 224 + 910 ~ D1K 225 + 060	花岗岩	构造影响破碎带	岩体极破碎、富水
11	D1K 225 + 810 ~ D1K 225 + 860	大理岩、花岗岩	岩性接触带	富水
12	D1K 225 + 990 ~ D1K 226 + 040	花岗岩、灰岩、石英砂岩	岩性接触带	富水

5 结论与讨论

5.1 TBM 卡机受困与物探成果耦合性分析

以地表物探电阻率值对 TBM 卡机概率进行分段分级,高黎贡山隧道 TBM 已施工段卡机高风险段落共有 8 段,对应正洞卡机里程耦合率为 40%,对应平导卡机里程耦合率为 57.1%,综合耦合率为 50%。

5.2 TBM 卡机受困与钻探成果耦合性分析

根据高黎贡山隧道深孔钻探资料及区调情况综合

分析,揭示 TBM 施工卡机高风险段落共有 7 段,其主要地质问题包括断层构造破碎带、构造影响破碎带、蚀变带及岩性接触带,对应正洞卡机里程耦合率为 50%,对应平导卡机里程耦合率为 50%,综合耦合率为 50%。

5.3 综合成果耦合性分析

通过对高黎贡山隧道 TBM 已施工揭示卡机受困情况地质条件的总结,与洞身地表物探及深孔钻探预测卡机高风险段落对比分析,其单项耦合概率均为



50%,耦合概率较低。将物探与钻探结论相结合后,TBM卡机高风险段落为12段,总长约2.05 km,约占TBM已施工段的31.6%,对出口工区主要地质问题总结更加全面,综合分析耦合率提升至71%。由此可见,地质深孔钻探对物探及地质调绘的验证工作极为重要。

#### 5.4 分析成果讨论

采用TBM施工的隧道工程,尤其是地质条件极为复杂地区,在前期勘测阶段,应根据地表物探成果资料,结合区域构造特征及地层条件,对构造界线、影响较大的岩性接触带、蚀变带等不良地质体进行有针对性的补充钻探勘测,做到提前预判提前处理,减小TBM卡机受困概率,提升其施工的安全性和高效性,为隧道工程建设提供更好的工期保障。

#### 参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.  
WANG Mengshu. Tunneling by TBM / Shield in China: State-of-Art, Problems and Proposals [J]. Tunnel Construction, 2014, 34(3): 179-187.
- [2] 高峰. TBM掘进机在国内外隧洞工程中的应用[J]. 电大理工, 2011(4): 9-11.  
GAO Feng. Application projects of TBM in China and Abroad [J]. Study of Science and Engineering at RTVU, 2011(4): 9-11.
- [3] 谢毅, 寇峻瑜, 姜梅, 等. 中国铁路发展概况与技术展望[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(1): 11-16.  
XIE Yi, KOU Junyu, JIANG Mei, et al. Development and Technical Prospect of China Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 11-16.
- [4] 刘术臣. TBM技术发展方向及其国内应用前景[J]. 铁道建筑技术, 2010(S1): 1-3.  
LIU Shuchen. TBM Technology Development and Its Application Prospect in China [J]. Railway Construction Technology, 2010(S1): 1-3.
- [5] 杨晓迎, 翟建华, 谷世发, 等. TBM在深埋超长隧洞断层破碎带卡机后脱困施工技术[J]. 水利水电技术, 2010, 41(9): 68-71.  
YANG Xiaoying, ZHAI Jianhua, GU Shifa, et al. Technology for Unblocking TBM Blocked in Fault Zone of Super-Long and Deep-Buried Tunnel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(9): 68-71.
- [6] 何小松. 浅析TBM施工技术的优势[J]. 地质装备, 2010, 11(2): 35-37.  
HE Xiaosong. Analysis on the Advantages of TBM Construction Technology [J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2010, 11(2): 35-37.
- [7] 司景钊. 亚洲铁路第一长隧: 大瑞铁路高黎贡山隧道[J]. 隧道建设, 2017, 37(7): 912-915.  
SI Jingzhao. Gaoligongshan Tunnel of Dali-Ruili Railway: The Longest Tunnel of Asian Railways [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(7): 912-915.
- [8] 黄力军, 陆桂福, 刘瑞德. 可控源音频大地电磁测深法应用实例[J]. 物探化探计算技术, 2006, 28(4): 337-341.  
HUANG Lijun, LU Guifu, LIU Ruide. Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 28(4): 337-341.
- [9] 杨少峰. 绳索取芯钻探技术浅析[J]. 中国金属通报, 2019(3): 290-292.  
YANG Shaofeng. Analysis of Core Drilling Technology [J]. China Metal Bulletin, 2019(3): 290-292.

(上接第124页)

- [3] 缪铭铭. 大同至西安客运专线最大坡度的选择[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(2): 56-60.  
MIAO Mingming. Research on Selection of Maximum Gradient for Datong-Xi'an Passenger Dedicated Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, 28(2): 56-60.
- [4] 孙林林, 崔树坤, 闫子权, 等. 京沪高速铁路提速至400 km/h曲线超高适应性研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(11): 96-99.  
SUN Linlin, CUI Shukun, YAN Ziquan, et al. Study on Adaptability of Curve Superelevation with Speed of Beijing-Shanghai High Speed Railway being Increased to 400 km/h [J]. Railway Engineering, 2021, 61(11): 96-99.
- [5] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].  
TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway[S].
- [6] TB 10082-2017 铁路轨道设计规范[S].  
TB 10082-2017 Code for Design of Railway Track [S].
- [7] 铁道第三勘察设计院集团有限公司. 大同至西安客运专线施工图设计说明[R]. 天津: 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 2010.  
The Third Railway Survey and Design Institute Group Co., Ltd. Construction Drawing Design Description of Datong Xi'an Passenger Dedicated Line [R]. Tianjin: The Third Railway Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 2010.
- [8] 李荣华, 白宝英, 等. 高速铁路工程设计技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.  
LI Ronghua, BAI Baoying, et al. High-speed Railway Engineering Design Technology [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021.