

# 铁路隧道超前地质预报方法综述

● 高维旭



**[摘要]** 随着铁路沿线地质条件的复杂性与不确定性加剧,周围岩石的物性参数以及环境的变化给勘察工作带来了巨大的困难,使其难以预测沿线的不良地质灾害类型和特征,导致现阶段施工过程中坍塌、冒水等异常现象频发。为了加快施工进度,保障施工安全,采用超前预报技术探测铁路隧道前方的围岩地质变化、富水状态、变形特征等不良灾害逐步成为施工的必要要素之一。随着复杂地质条件下隧道修筑工程的推进,重视并熟知隧道超前地质预报方法,才能大大提高隧道工程的施工安全质量,为施工单位节约大量成本,进而显著提高社会效益。

**[关键词]** 铁路隧道;超前地质预报;不良地质灾害;安全施工

## 研究背景及意义

近年来,由于铁路隧道施工地形地质条件日趋复杂,在前期勘察手段有限的情况下,难以对工程地质区域的不良地质灾害有全面的掌握,导致突发隧道洞内坍塌、突水、有害气体泄漏等地质灾害时,无法及时做出应对,给隧道施工、人身安全、财产损失等方面造成了重大影响。

为了降低隧道施工时不良灾害发生的可能性,确保隧道施工的安全、质量和进度,有效地掌握隧道施工期间掌子面前方的地质情况显得尤为重要。回溯至20世纪30年代,诸多学者聚焦于对隧道内掌子面前方异常体不同的地球物理响应规律展开研究,将不同理论应用于隧道探测实践,通过对开挖掌子面前方的地质情况及不良地质体的工程物理性质、位置信息进行采集、处理与阐释,进而对掌子面前方不同物性参数进行定性的表征,提高对前方异常灾害的判别水平。

随着隧道工程建设的持续推进,重视超前地质预报技术领域,积极探索多元化、高精度、智能化的综合超前地质预报的模式成为必然趋势。借此途径,提高预报的重要度、可信度,减少施工中岩体塌方、突水等地质灾害的影响,保障安全、快速施工,更好地服务于施工过程,推动高品质铁路工程建设。

## 铁路隧道超前地质预报的发展

超前地质预报技术最初发展于国外。20世纪50年代,国内工程人员对川黔铁路凉风垭隧道进行地质核查,将地质法初步应用于平行导坑施工过程中。20世纪70年代后,超

前钻探方法在隧道首先得到应用,借此能够直观地了解到掌子面前方的地质特征,减少了异常灾害发生的频率。自此,人们开始注重隧道前方的预报工作。随着地表勘探理论在隧道探测方面的深入研究,地震法、电磁法、声波法等不同物性参数下的单一预报方法被应用于工程实践。根据工程现场的差异化需求,应用不同的预报方法预测出隧道前方不同的物性特征,进而辨别出前方可能的地质异常,为施工保驾护航。

目前,鉴于复杂隧道的预报工作中单一物性预报方法存在其适应性局限和固有短板,难以全面、准确地发现不良地质体,综合超前地质预报系统得以发展。该系统将预测过程分为三个阶段,分别是长距离预测、中距离预测和短距离预测,三个阶段相辅相成,相互验证,方能得到可靠的地质预报结果。20世纪90年代,地质与钻探相结合的综合预报模式在秦岭隧道中付诸实践应用,该方法作为铁路隧道首次综合性预报尝试,地质描述与钻机钻进工作贯穿隧道始终。随着高等级铁路建设的需求,特别是西部艰难复杂山区建设步伐的加快,隧道中所可能发生的地质灾害将更加多样,也更加频发。为此,一些学者开展了隧道超前地质预报的综合性预测和评价工作。李天斌等人考虑到不同差异物性以及地表分析,采用地质素描贯通协同多种物探手段加以辅佐的预报模式,针对铜锣山岩溶隧道中5种常见不良地质情况,提出合理的预报工作流程,通过神经网络统计方法,实现了对常见不同地质灾害特征进行高分辨识别。Tan等人通过将物探领域多预报方法相结合,并应用于贵阳至广州高速铁路斗篷山隧道的地质超前预报中,从而得到了准确

可靠的地质预报结果。Chen等提出了工程物探与工程地质相结合的综合技术,它利用隧道地震预报(TSP)等工程物探手段对前方地质情况进行探测,并在隧道内或地表进行测量勘察,最终得出精确的结果,提高了预测的准确性,使开挖更经济、更安全。He等提出了地质雷达与超前水平钻孔相结合的综合超前地质预报方法,并在广西岩溶地区隧道施工中得到了成功应用。

在西部大开发中,复杂山区地质条件为隧道施工带来了重重考验,重视隧道超前地质预报工作已成为广大工程技术人员和管理人员的共识,该项作业已经成为隧道施工过程中重要的且不可缺少的工序。目前结合工程领域预报实际应用情况,可将铁路隧道超前地质预报方法分为短距离、中长距离预报两类。对于不同的地质情况,了解各种预报方法的工作原理,充分发挥优点,结合多种方法弥补单一预报的缺点与不足,才能使铁路超前地质预测预报工作更好的发挥,进而准确预报掌子面前方地质情况,更好的保障隧道安全、顺利的施工。

#### (一)短距离预报方法

短距离地质预报通常是指探测距离小于10米的预报方法,该方法是根据隧道围岩地质实际情况,结合勘察阶段对于掌子面的描述,对隧道前方岩性、含水状态、围岩等级、变形情况等地质特征进行描述。对于掌子面的具体情况,该方法最为直观,同时作为验证中长距离超前地质预报方法的最为有效、可靠的手段,在实际应用过程中,也可结合预报结果对施工方案提出相应的指导建议。目前铁路隧道中常用的短距离预报方法可分为地质调查法和加深炮孔法。

##### 1.地质调查法

地质调查法作为最早期开展的超前预报方法,是基于区域地质、地表资料以及隧道掌子面实际呈现状况,对隧道洞内掌子面的岩性特征、地质年代、构造等情况进行表述。目前该方法可分为洞内掌子面地质编录、洞身地质素描和地表补充调查三种。

洞内掌子面地质编录工作通常有效预报为3~10米(视围岩实际条件而定),该方法作为综合预报模式的根本,需要对掌子面前方岩性特征、构造特征、富水特征等进行具体描述,同时可验证中长距离预报结果,增强物探数据解译的准确性。

洞身地质素描工作是对已开挖隧道过去100米的实际地质及含水情况进行总结分析,形成地质剖面展示图,其更为直观地全面地反应隧道每100米的地质变化情况,是对后方已施工阶段的总结,同时也为前方开挖提供参考建议。

地表补充调查则是基于原始地质资料,结合铁路沿线地质灾害评估,对隧道沿线的整体地质特征进行分类表述,该方法的优点是可以提供隧址区详细的区域地质资料,缺乏对

实际开挖地层、地质构造等表述。

##### 2.加深炮孔法

加深炮孔法是为了确定下一循环的围岩情况而水平钻孔,通常孔深为5-8米,该孔即作为探测孔,又可作为爆破孔,该方法通过观察钻进过程中时间、速度、压力、岩性、出水情况等,对前方地质特征进行评价,相对于地质调查法,其布置钻孔方式,数量多样,能更好地反应掌子面前方的异常情况,尤其是对隧道掌子面前方的小型溶洞、含水层等探测效果较好。

#### (二)中长距离预报方法

中长距离超前地质预报方法通常是指探测距离在30至120米之间的预报模式,该类方法均是基于地球物理理论,通过对不同物性参数的采集,解译分析,从而准确预报出前方不良地质体的特征,包括位置、大小等情况,是综合预报模式中的重点,给施工方有时间来预判前方施工方案,以预防应对前方较长距离下可能发生的不良地质灾害。目前铁路隧道中常用的中长距离预报方法可分为地球物理法和钻探法两类,其中最常见的物探方法为HSP水平声波剖面法、红外探水法、地质雷达法、瞬变电磁法、激发极化法、TSP地震波反射法。钻探法主要为超前水平钻孔法。

##### 1.HSP水平声波剖面法

HSP探测技术建立在声波理论的基础之上,以不同地质体间的声学特性差异为前提,据此探查前方岩体的特征。其实质是将激发和接收布置在隧道边墙镜像位置的孔内,构成水平剖面,通过激发一定频率的地震波,根据接收到不同介质反射信号,结合隧道施工掌子面地质调查,推测前方岩体的变化情况,该方法的优点显著,一方面,震源和接收检波器位于开挖面之外,占用施工时间短,对施工干扰小;另一方面,能够获得的物性参数较多,其预报有效距离可达80~120米,对隧道破碎带、节理发育、地下水等不良地质体的预报结果准确,效果良好。

##### 2.红外探水法

红外探水法是利用红外测温原理,当隧道前方存在含水层时,含水层就与岩层存在一定的温度差异,这种异常温度信息被接收转化成场强变化,通过分析场强变化的数据大小、位置即可确定隧道前方或四周含水体的情况,从而为含水层的预报提供依据。该方法测量快速,施工干扰小,有较高的定性判别准确率,缺点是只能测量出含水体的方位,测量不出定量参数,红外探水的有效预报距离可达20~30米。

##### 3.地质雷达法

地质雷达法是目前超前地质预报的主要探测方法。该方法基于不同电性差异条件下电磁波反射的特点,通过向隧道前方传送高频脉冲电磁波,当遇到存在电性差异的地下目

标体,如空洞、地层分界面等地质异常时,电磁波便发生反射,根据接收反射回的雷达波形、振幅强度、双程走时等参数,便可推断地下目标体的空间位置、结构等信息,从而实现对手子面前方异常目标物的探测。其预报有效距离为15~30米(视围岩情况而定),缺点是测线外盲区较大,掌子面的平整程度对于预报结果的准确性影响较大。

#### 4.瞬变电磁法

瞬变电磁法基于电磁感应定律,利用不接地的回线或磁偶极子,向前方发射脉冲电磁波作为激发场源,脉冲电磁波结束以后,探测目标体在激发场的作用下,其内部会产生感生的涡流,通过观察形成的二次涡流场的强弱、空间分布特性和时间特性,从而判断目标体的位置和分布状态。该方法对低阻地层、含水层、裂隙等异常体较为敏感,其有效距离达到50~80米,缺点是存在探测盲区,易受隧道施工过程中金属的干扰。

#### 5.激发极化法

激发极化法通常用于隧道前方岩石空洞和水体的探测。相较于瞬变电磁法对于含水体的定性描述,该方法对含水层有一定的定量表征,利用地质体之间的极化效应,获得与岩体孔隙率相关的参数,通过对百分频率效应(PFE)和电阻率两种参数的分析,可以有效地反映前方的含水位置、大小等情况,而且对节理裂隙、岩体破碎程度较为敏感,但对软硬岩体的区分界定方面不太理想。

#### 6.TSP地震波反射法

TSP隧道地震波反射法,是目前国内外在该领域较先进的隧道隧洞及地下开挖工程的探测方式。借助激发和接收地震波源,依据获得的多物性特征参数(地震波传播速度和反射系数、纵横波速度变化、地震波旅行时间等),对隧道工作面掌子面前方不良地质体的性质、位置和规模进行准确地探测,其中包括断层破碎带、含水带、地层变化等情况,是目前铁路隧道工程最为有效地预测方法之一。相较于其他地质超前预报手段,该方法适用范围广,可适用于各类地质情况,预报距离长。相较于其他物探方法,该方法有效预报距离可达到100~120米。不足之处是现场的放炮和接收钻孔的位置、长度、角度等布置条件都是会对探测质量产生影响,施工作业较为耗时。

#### 7.超前水平钻法

超前钻探法作为中长距离预报的钻探方法,相较于加深炮孔法,其探测有效距离长,可达到20~80米(视围岩情况而定),布置方式较为简单,通常是一孔式,即用现场钻探设备(冲击钻)向掌子面前方钻进,根据钻进的时间、速度、堵

塞情况来直接反映隧道掌子面前方地质特征,包括岩性、出水情况、完整程度。与其他地球物理方法相比,能够直观的确定掌子面前方的围岩情况,同时也是对中长距离物探预报方法的验证,缺点是一孔之见,耗时较长。

### Q 结束语

(1)本文针对铁路隧道中超前地质预测预报的各种方法予以简要阐释,从原理出发指出了各种方法的不同及优缺点,为隧道施工各方进一步了解超前地质预报技术的重要性提供帮助,同时也为专业的超前地质预报人员提供更多有针对性的选择。

(2)面对复杂地质条件,不仅需要地球物理方法进一步地研究,更需要充分发挥各种预报方法的优势,克服其缺点,将物探技术与地质、钻探相结合,整合多种方法,针对不同的地质条件,拟定出不同组合方式下的隧道综合超前地质预报方法,这将大大提高铁路隧道预报的准确性,进而更好地保障隧道施工。

### 参考文献

- [1]何发亮,陈成宗.铁路隧道施工地质超前预测预报技术[J].铁道工程学报,2005(S1):440-447.
- [2]李术才,刘斌,孙怀凤等.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,2014,33(06):1090-1113.
- [3]王良奎.多种超前地质预报方法在隧道施工中的应用[J].金属矿山,2001,(11):45-47.
- [4]杨果林,杨立伟.隧道施工地质超前预报方法与探测技术研究[J].地下空间与工程学报,2006(04):627-630,645.
- [5]李天斌,孟陆波,朱劲等.隧道超前地质预报综合分析方法[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2429-2436.
- [6]陈建涛.HSP水平声波剖面法铁路隧道预报技术应用[J].建筑技术开发,2022,49(02):82-84.
- [7]孙凯,朱占龙.地质雷达及红外探水技术在隧道超前预报中的应用[J].青海交通科技,2021,33(04):142-149.
- [8]郭伟伟.隧道施工超前地质预测预报综合技术方法研究[D].成都:西南交通大学,2006.
- [9]薛国强,李貅,底青云.瞬变电磁法理论与应用研究进展[J].地球物理学进展,2007,(04):1195-1200.

### 作者简介:

高维旭(1998—),男,汉族,陕西咸阳人,硕士,助理工程师,中铁第一勘察设计院集团有限公司,研究方向:岩土工程勘察与设计。