

文章编号: 1004-2954(2016) 05-0079-05

壁板坡隧道富水逆断层综合超前地质预报实践

曾 鹏¹, 钟勇奇¹, 江星宏², 杨新安¹

(1. 中铁五局集团第四工程有限公司, 广东韶关 512031; 2. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘 要: 壁板坡隧道为沪昆客运专线最长隧道, 洞身被3条逆断层带切割, 围岩破碎, 地下水发育, 工程地质条件复杂, 针对壁板坡隧道富水逆断层带, 建立超前地质预报体系。在分析总结已有超前地质预报成功经验的基础上, 从短距离预报和中、长距离预报的角度, 建立适用于壁板坡隧道复杂地质条件的超前地质预报体系。在隧道大角度穿越杨梅山-小达村逆断层中, 以TSP长距离预测、红外探水短距离预测、超前地质钻探复核预测的方式, 准确探知施工中可能出现的富水破碎带的位置和富水程度, 为防范施工风险, 确保施工安全提供了可靠依据, 验证了该超前地质预报体系的可靠性及其效果。

关键词: 铁路隧道; 超前地质预报; 富水逆断层; 岩溶; 综合预报技术

中图分类号: U452.1⁺1 **文献标识码:** B **DOI:** 10.13238/j.issn.1004-2954.2016.05.017

Advanced Geological Prediction of Water-rich Reverse Faults in Tunnel Wall Slope

ZENG Peng¹, ZHONG Yong-qi¹, JIANG Xing-hong², YANG Xin-an²

(1. The Forth Engineering Co., Ltd., China Railway No. 5 Engineering Group, Shaoguan 512031, China; 2. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Bibanpo extra-long tunnel is the longest tunnel on Shanghai-Kunming high-speed railway. The tunnel body is cut by three by faults with broken surrounding rock, rich groundwater and complex engineering geological conditions. An advanced geological prediction system is established in perspective of short-term forecasting and medium and long-term forecasting for such a tunnel. The system uses TSP for long range forecasting, infrared exploring meter for short range and geological drilling to accurately detect the location of water-rich broken zone and the degree of water content, providing an important basis for construction plan and tunnel safety and verifying the effectiveness of the system in engineering application.

Key words: Railway tunnel; Advanced geological prediction; Water-rich reverse fault; Karst; synthetic prediction technique

壁板坡隧道全长14 756 m,为国内在建高铁特长隧道之一,是沪昆客运专线全线控制性工程。隧道集高承压水、岩溶、断层破碎带、煤层瓦斯、采空区、高地应力、岩爆等不良地质于一体,属一级高风险隧道,施工难度和安全风险极大,工期紧张,施工压力大。

地质工作是隧道工程的基础,准确掌握隧道地质情况对确定施工方案,保证施工进度和施工安全有重要意义^[1]。超前地质预报作为灾害预防的常规方法,

合理有效的使用具有重要意义。不成体系的超前探测不能准确探知不良地质体,易导致施工盲目,发生安全事故。如宜万铁路马鹿箐隧道和野三关隧道突水事故。结合多种超前地质预报技术、取长补短、相互验证、相互补充,建立适合于探测壁板坡隧道富水断层的综合超前地质预报体系,是施工安全的重要保障^[2-3]。

结合目前超前地质预报的实践成果,从短距离预报和中、长距离预报的角度出发,建立了适用于不同围岩条件的超前地质预报体系,并结合壁板坡隧道平导大角度穿越杨梅山-小达村逆断层的成功预报,验证了所采用的预报体系的准确性和适用性,对复杂地质

收稿日期: 2015-07-28; 修回日期: 2015-08-30

基金项目: 中铁五局集团科技研究开发计划课题(2012005)

作者简介: 曾 鹏(1978—),男,工程师, E-mail: 184634347@qq.com。

条件下的隧道施工超前预报有指导意义。

1 综合超前地质预报体系

超前地质预报体系在国内隧道工程中已有多年的实践,如宜万铁路隧道、厦门海底隧道、青岛胶州湾海底隧道等。壁板坡隧道断层带围岩破碎富水,需结合该隧道的深埋、断层破碎、富水等特征,借鉴已有工程经验,综合分析各种探测方法的优缺点,取长补短,建立适用于壁板坡隧道的超前地质预报体系^[4-8]。

超前地质预报方法,根据时间和空间距离可分为

短距离预报和中长距离预报,按实施方法可分为超前钻探和物探方法。在超前地质预报的各种方法中,TSP 作业快,测距长,成本低,适用于中、长距离预测;地质钻探预测精度高,费用高,适用于特殊区段复核预测;地质雷达探测距离短,速度快,成本低,对隧道及周围空洞、含水状况预测精度高,适用于短距离预测;红外探水灵敏度高,解译快,适用于短距离预测;常规地质法成本低,速度快,不占用施工时间,能全面获得工作面岩性,适用于短距离预测^[9-13]。常用隧道超前地质预报方法及其优缺点如表 1 所示。

表 1 常用隧道超前地质预报方法及其优缺点

序号	探测方法	优势	不足
1	地质素描	地质素描或数码成像	获得隧道地质基础资料
2		TSP(150~300 m)	远距离探测断层破碎带、岩层分界面、大型溶洞
3	物探	地质雷达(30 m)	近距离探测隧底、工作面前方岩溶
4		红外探水(30 m)	近距离探测含水水体
5	地质钻探	水平钻探(30~50 m)	能准确探测断层、岩溶、瓦斯、重大物探异常段等
6		隧底钻探(5~10 m)	隧底岩溶、暗河、重大物探异常段等
7	加长炮孔	加长炮孔钻探(3~6 m)	工作面短距离岩溶、地下水等
			预报距离短,预报范围局限

本文采用的超前预报体系包括宏观预测、长距离预报、短距离预报、复核预报 4 个阶段,该体系的流程图见图 1。体系从隧址区域构造资料、地质勘探资料出发,通过工程分析,粗略得到隧道区域地层岩性、地质构造和水文地质状态,进而确定隧道穿越区域的围岩等级、灾害等级、灾害类型。宏观预测隧道内断层、岩溶、地下水、煤层、瓦斯等不良地质体可能的分布区域和分布规模。

结合 TSP203、陆地声纳等远距离探测仪器,预测隧道开挖面前方大范围区域可能出现的不良地质,初步确定断层破碎带、岩层分界面,溶洞等不良地质体的位置、产状和富水程度。

结合地质雷达、红外探水等短距离预报方法,对远距离地质预报探得的不良地质体进行针对性探测,确定前方地层的岩性、地质构造、地下水状态,确定不良地质体位置、规模和不良程度。为调整围岩等级、支护手段和支护参数提供依据。

采用超前地质钻探对可能引发灾害的不良地质体进行验证探测,获得岩性参数、岩层产状和影响范围,采取专项措施对不良地质体进行处理,勘探处理后围岩条件,判断其是否满足开挖要求,若满足则预报进入下一循环。

1.1 地质预报方法

1.1.1 地质素描法

地质素描是利用素描的方法描述开挖面的围岩特性、构造特性和含水状态。通过地质素描,了解区域地质和附近岩体构造单元及其特征,以及工程范围内的地层岩性、围岩类别、地下水发育特征等。

1.1.2 红外探水

红外探水是根据一切物质都在向外辐射红外电磁波的现象,通过接收和分析红外辐射信号进行超前地质预报的物探方法,有效预报距离在 30 m 以内。红外探水具有探测速度快,不占用施工时间,资料分析快,能有效预报工作面前方有无隐伏含水水体,但对含水层的位置、富水状态、水压、出水量却无法预知。

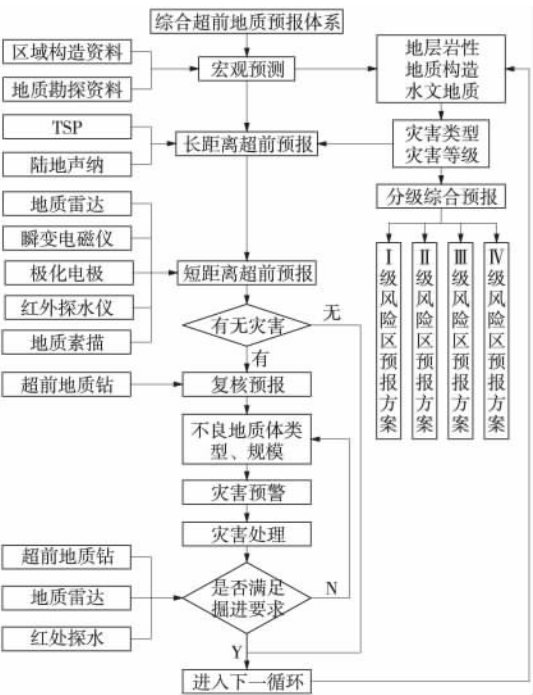


图 1 超前地质预报体系^[10]

1.1.3 超前地质钻探

超前地质钻分为冲击钻和回转取芯钻,一般地段采用冲击钻,每循环可钻30~50 m。可通过冲击器的响声、钻速及其变化、岩粉、卡钻情况、钻杆振动情况、冲洗液的颜色及流量变化等粗略探明岩性、岩石强度、岩体完整程度、溶洞、暗河及地下水发育状况。超前地质钻探是有效、直观、准确的超前预报方法,但其占用工作面,影响掘进效率。

1.1.4 TSP

TSP超前预报方法属于多波多分量高分辨率地震反射法。通过小药量爆破产生地震波信号沿隧道方向以球面波的形式传播,在岩体界面处被反射,通过计算分析接收的反射信号可获得各种围岩结构面的产状,以及岩石的弹性模量、密度、泊松比等参数。TSP具有长距离探测的能力,有效探测距离可达150~300 m,能对掌子面前方岩性变化的岩溶、断层、软弱面或含水层等做出定性探测,但难以对突涌水量和水压进行定量预测。

2 杨梅山—小达村断层探测实践

壁板坡隧道不良地质中,杨梅山—小达村逆断层距洞口最近,规模最大,且与大罗冲断层相近,施工风险大,在施工中采取综合超前地质预报技术来预报围岩状态,保障施工安全。

2.1 概况

杨梅山—小达村断层为一高角度的压性逆断层,规模较大,断层走向北偏东 $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$,倾向南东,倾角 $31^{\circ}\sim 70^{\circ}$,断距达700~2 000 m。断层上盘为石炭系灰岩,下盘为二叠系玄武岩及茅口组灰岩。断层破碎带宽100~150 m,带内节理裂隙发育,岩体破碎,可见断面擦痕,地貌上为断层崖。

杨梅内—小达村断层的推断范围为隧道DK890~DK891段,围岩纵断面特征如图2所示。隧道穿越围岩从左到右依次为:石炭系下统大塘组上段(C_{1ds})灰岩夹白云岩、页岩;石炭系下统岩关组(C_{1y})泥质灰岩夹页岩;峨眉山玄武岩组($P_2\beta$)泥岩夹砂岩。杨梅



图2 隧道纵断面岩性

山—小达村断层不仅是断层破碎带,也是非可溶岩与非可溶岩的接触带。

杨梅山—小达村断层处于 I_2 水系统中,该系统地表上属北盘江水系,该系统含水层富水性较好,由南向北沿途有泉点出露,泉点高程高,地下岩溶水较发育,且具有一定承压性,隧道施工中发生涌水、突水、突泥等地质灾害的风险较高。

2.2 综合超前地质预报

杨梅山—小达村断层区段围岩破碎,岩溶地下水发育,灾害等级高,在施工中需采取综合超前地质预报体系来保障施工安全^[14-15]。超前地质预报采取TSP先行,红外探水紧跟,超前地质钻验证的方式进行。

2.2.1 TSP

(1) TSP探测主要参数

掘进面位置为PDK980+267时实施TSP探测,设计为24个炮孔,2个接收器接收,位于隧道里程PDK980+198处。通过试验,确定采用药量为75~100g乳化炸药。采用X-Y-Z三分量接收数据,采样间隔62.5 μs ,记录长度451.125 ms。实际激发24炮,记录合格24炮,可用于数据处理和解释。炮眼布置如图3所示。

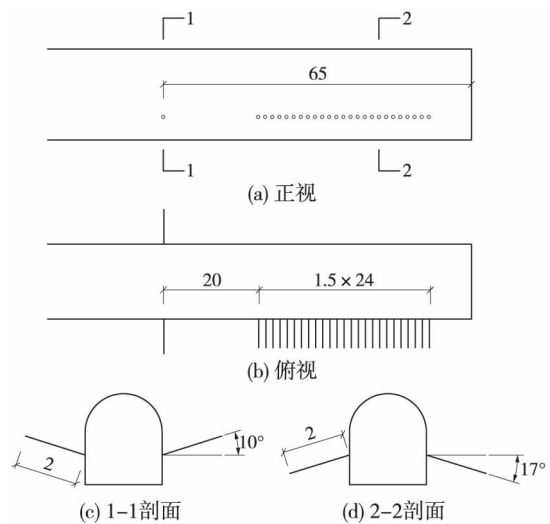


图3 炮孔布置(单位:m)

炮孔布置时,接收器距地面高度1.5 m,孔径50 mm,孔深2.0 m,向上倾斜 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$,距离掌子面约65 m,在隧道左、右边墙各1个,用锚固剂固结。各炮点与接收器孔基本在同一水平面,共24个,沿径向布置,直径40 mm,孔深1.4~1.9 m,向下倾斜 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ (激发时水封填炮孔),在隧道的左边墙,第一个炮孔距离接收器20 m,其余炮孔间距约1.5 m。

(2) TSP成果解译

TSP探测结果如图4所示,图中上部为TSP探测获得的围岩参数信息,下部为2D成果图。对比分析

波速、泊松比、密度及静态杨氏模量在探测里程的波动规律,可将结果分为 3 段,图中以黑线隔开区分,具体如下。

①PDK980+267 ~ PDK980+314(47 m)

此段各项参数信息小幅波动,2D 成果图中围岩模量介于浅蓝与浅红间,围岩完整性较好。在里程 DK980+280 ~ YDK980+294 处,波速、泊松比降低,密度、模量突变,局部围岩较破碎,并有小规模岩溶发育,弱富水,施工中应及时支护。

②PDK980+314 ~ PDK980+349(35 m)

此段各项参数信息不规律大幅波动,P 波速度小幅下降,泊松比小幅增减,2D 成果图中红蓝相间,围岩破碎,裂隙较发育,弱~中等富水。其中 PDK980+335 ~ PDK980+343 段(图中矩形框范围),各项围岩参数陡降陡升,存在溶洞或溶蚀裂隙,施工时需采用超前钻探进行核实,注意防排水。

③PDK980+349 ~ PDK980+377(28 m)

此段 P 波波速下降明显,泊松比陡降,围岩较破碎~破碎,局部裂隙较发育,岩溶弱发育,较富水,应加强支护强度。

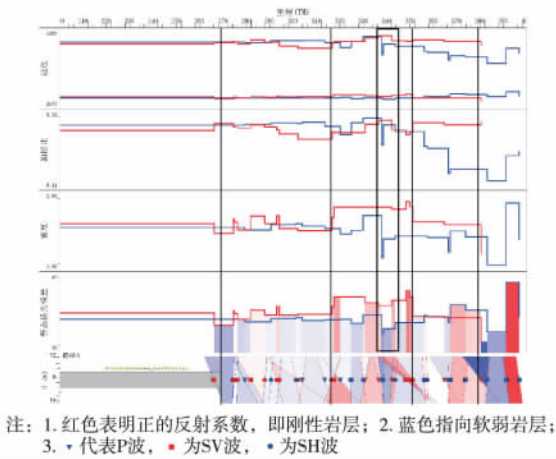


图 4 TSP 超前地质预报成果

2.2.2 红外探水

平导里程 PDK980+310 处红外探水测线布置如图 5 所示。掌子面探测布设 4 条测线,每条测线均布 6 个测点。纵向测线布设在底板中部、右边墙脚、右边墙、拱顶、左边墙、左边墙脚,每条测线均布 12 个测点,测点间距为 5 m。

(1) 开挖面岩体上布置 24 个测点的红外辐射场强值如表 2 所示,横纵向极差最大分别为 25、27 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,整个工作面最大值为 263 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,最小值为 234 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,差值为 29 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。一般认为红外探测理论安全值为 10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$,其横纵向极差均远大于此,可判定工作面前方极可能存在出水点。

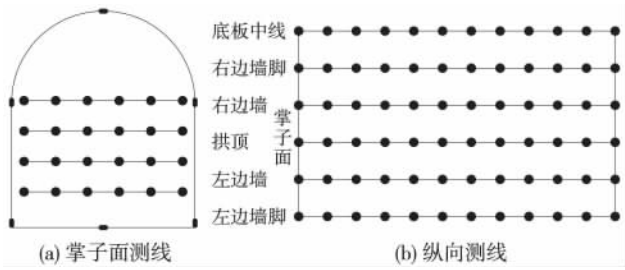


图 5 红外测线布置

表 2 工作面红外探测记录							$\mu\text{W}/\text{cm}^2$
测点号	1	2	3	4	5	6	极差
第 1 行	240	255	256	238	251	263	25
第 2 行	252	242	243	242	260	255	18
第 3 行	243	241	257	243	239	236	21
第 4 行	234	244	235	254	238	240	20
极差	18	14	22	16	22	27	

(2) 现场所测左边墙脚、左边墙、拱顶、右边墙、右边墙脚、底板中线的辐射场强值如图 6 所示。在隧道里程 PDK980+255 ~ PDK980+285 范围,红外强度缓慢上升,里程 PDK980+285 ~ PDK980+310 范围,红外强度呈指数上升,由此可判定隧道前方富水,而拱顶和右边墙止升幅度较大,由此可推测,水流位置为断面右上方。

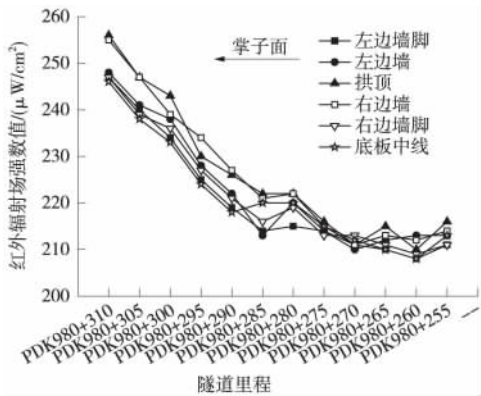


图 6 隧道纵向红外辐射强度

结合(1)、(2)节所述及已开挖揭示的围岩情况推测里程 PDK980+310 ~ PDK980+340 富水,可能在平导右上方有出水点。

2.2.3 超前地质钻探

TSP 和红外探水结果显示,平导里程 PDK980+310 ~ PDK980+340 范围内围岩破碎,富水程度高,可能危及施工安全,需采用超前地质钻进行验证。结合工程实际,采用冲击钻方案,根据钻进参数、出水量、岩屑情况判定前方围岩破碎程度和富水状态。

钻进参数中推进力、钻孔速度、回转数、扭矩与钻进深度的关系见图 7,可见,钻进过程中,钻进速度波动大,钻孔过程中偶尔出现卡钻现象,推进力波动频

繁,围岩破碎,节理裂隙较发育。平导 PDK980+313 ~ PDK980+315、PDK980+323 ~ PDK980+326、PDK980+342 ~ PDK980+344 里程范围内,扭矩大幅下降,存在软弱夹层或溶蚀洞穴,由流出岩屑判定为泥岩夹层。钻进结束终孔时,有较大水流流出,前方岩层存在承压水体。超前钻探结果显示:平导里程 PDK980+310 ~ PDK981+346 范围内,岩层以灰岩为主,岩质较坚硬,中厚层状,局部夹泥岩。施工时进一步采用加深炮孔进行探测,并加强突泥、突水灾害防范。

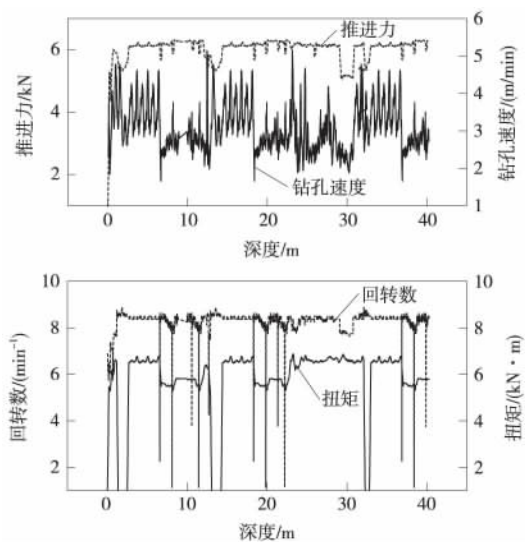


图7 钻探成果

3 探测结果与评价

如图8所示,平导进口工作面 PDK980+342 岩性揭示为中风化灰岩,岩体破碎,溶蚀发育,较坚硬。顺层节理发育,间距为 0.3 m,层间夹黄色黏土,节理方向与隧道轴向呈 45° 夹角。工作面右上方有股状出水,具有承压性,水量较大,水质浑浊,需加强防排水。开挖面稳定性一般,整体为 V 级围岩,需加大支护强度。



图8 开挖揭示隧道工作面

结合超前地质预报和工作面开挖揭示情况,可以得出,在大角度穿越杨梅山—小达村断层中,综合超前地质预报体系的应用,能准确探知工作面前方一定范

围内不良地质体的类型和程度,为施工提供预警,保障施工安全。

4 结语

(1) 通过对比分析不同超前地质预报方法的适用性、优缺点和预测范围,建立了综合超前地质预报体系,并在壁板坡隧道工程中成功应用。

(2) 杨梅山—小达村断面规模大、岩层破碎、地质灾害可能性大。施工中采用了 TSP、红外探测和超前地质钻探相结合的综合地质探测和预报方法,预报断层分布、破碎情况、富水程度与开挖揭示相近,证明综合超前地质预报体系的准确性高,效果好。

(3) 不同的隧道超前地质预报技术受限不同,各有优缺点,只有开展多层次、多手段的综合超前地质预报,并贯穿于施工全过程,才能提高超前地质预报精度,保障复杂地质条件下的隧道施工安全,降低工程风险。

参考文献:

- [1] 刘辉,张智超,王林娟. 2004 ~ 2008 年我国隧道施工事故统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(1): 96-100.
- [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(6): 1090-1113.
- [3] 陶志刚,张斌,何满潮. 罗山矿区滑坡灾害发生机制与监测预警技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011(S1): 2931-2937.
- [4] 王尽忠. TSP 超前地质预报在中天山隧道 1 号斜井雁行式断裂带探测中的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2013, 11(5): 66-68.
- [5] 薛翎国,李术才,苏茂鑫,等. 隧道施工超前地质预报实施方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2416-2422.
- [6] 罗利锐,刘志刚,闫怡冲. 超前地质预报系统的提出及其发展方向[J]. 岩土力学, 2011(S1): 614-618.
- [7] 薛翎国,李术才,苏茂鑫. 青岛胶州湾海底隧道含水断层综合超前预报实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2081-2087.
- [8] 胡辉荣. TSP203 Plus 超前地质预报系统在高竹顶隧道断层中的应用[J]. 铁道工程学报, 2011(5): 1-4.
- [9] 苏茂鑫,钱七虎,李术才,等. 一种岩溶地质条件下的城市地铁超前预报方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1428-1434.
- [10] 舒森. 岩溶隧道突水突泥预报综合评估[J]. 铁道标准设计, 2015(4): 72-79.
- [11] 王利伟,徐永明. 综合超前地质预报在隧道施工中的应用探讨[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(S1): 164-167.
- [12] 梁树文. 宝兰客运专线黄土隧道超前地质预报方法的研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(3): 87-90.
- [13] 王振宇,程国峰. 基于掌子面编录和地质雷达的综合超前预报技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(A02): 3549-3557.
- [14] 原小帅,张庆松. TSP 超前地质预报异常地震波信号[J]. 山东大学学报: 工学版, 2009, 39(4): 53-56.
- [15] 张庆松,李术才. 公路隧道超前地质预报应用现状与技术分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 766-771.