

doi: 10.11720/wtyht.2022.1167

范占锋, 蔡建华, 赵伟. TSP 在高地温—高地应力隧道地质预报中的问题及改进[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 268–274. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1167>

Fan Z F, Cai J H, Zhao W. Problems and improvements of Tunnel Seismic Prediction in geological prediction of tunnels under high geotemperature and high in-situ geostress[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 268–274. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1167>

# TSP 在高地温—高地应力隧道地质预报中的问题及改进

范占锋<sup>1</sup>, 蔡建华<sup>2</sup>, 赵伟<sup>3</sup>

(1. 成都大学 建筑与土木工程学院, 四川 成都 610106; 2. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 611731; 3. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222)

**摘 要:** 正在建设的川藏铁路有大量隧道具有高地温、高地应力特征, 如何提高高地温—高地应力隧道超前地质预报的精度是工程建设面临的一大难点。以 TSP 法超前地质预报为例, 分析该方法在高地温—高地应力隧道探测主要存在两方面的问题: 一方面是采用乳化炸药和塑料导爆管在高岩温炮孔中激震时易发生拒爆、哑炮及瞎炮, 影响数据采集; 另一方面是数据处理未考虑高地应力隧道已开挖区和未开挖区的波速变化。针对这些问题, 提出六点改进措施, 即: 研制绝热保温袋起爆药包、建立基于多元地质信息的智能工程评价体系、改变 TSP 的激震方式、推广超前地质预报新技术新方法、研发适用于 TBM 的超前地质预报系统、改善地质预报组织管理。这些措施可为高地温—高地应力地区隧道超前地质预报的高效探测提供借鉴。

**关键词:** 地质预报; 隧道; 高地温; 高地应力; 地震波

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2022)01-0268-07

## 0 引言

我国虽已是隧道大国, 却还不是隧道科技强国, 在隧道与地下工程建设领域还存在一些亟待解决的问题, 机遇和挑战并存<sup>[1]</sup>。正在修建的川藏铁路以及大型水电工程地下硐室沿线, 无论如何都避绕不开无数大小断层破碎带、高地温、高地应力、冻融以及敏感生态区域, 如何确保这些重大工程建设安全是当前面临的一大关键难点, 需要做好安全前置预判等工作。制约长大隧道安全高效建设的主要因素是极端复杂的不良地质条件, 这也被公认为隧道建设的难点<sup>[2]</sup>。如何提高隧道施工期间的超前地质预报的准确度又是隧道建设重点中的难点。当前, 隧道超前地质预报的实施效果除了与本身技术水平有关外, 还与岩体的温度及应力状态关系极大。

从 20 世纪 90 年代至今, 伴随着我国大型基础

设施的建设, 隧道超前地质预报技术在国内隧道施工中逐渐趋于完善, 预报精度不断提高, 预报方法趋于多样化。其中弹性波反射法应用最多, 如 TSP (tunnel seismic prediction) 隧道地质预报法、HSP (horizontal sonic profiling) 水平声波剖面法、隧道负视速度法、TRT (tunnel reflection tomography) 隧道反射层析成像法、陆地声呐法、TGP (tunnel geology prediction) 隧道地质预报法等, 其次是电磁波反射法、瞬变电磁法、激发激化法等; 这些预报方法对不良地质体的识别各有千秋。总的来讲, 工程师们总是希望预报距离越长且精度越高越好, 但是从已有的工程实践中可以看出, 这两者是相互制约的, 即预报距离长会使得预报精度降低, 所以, 很多专家学者提出了综合超前地质预报方法<sup>[3-6]</sup>。

隧道超前地质预报技术已经得到了长足发展, 也暴露出不少问题, 最主要的问题是如何判读特定环境因素(高地应力、高地温、高水压、岩溶地区、地

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-11-02

基金项目: 四川省科技计划项目(2019YJ0667); 中国铁建股份有限公司科技重大专项(2019-A05); 成都大学基金项目(2081921006)

第一作者: 范占锋(1985-), 男, 山西运城, 讲师, 博士, 主要从事岩石动力学、隧道超前地质预报方面的研究工作。Email: 695950248@qq.com

震频发地区)下的不良地质条件,提高不良地质对象的定位精度。如:徐志纬<sup>[7]</sup>提出在深埋地下厂房、深埋隧道等地下工程地质问题的超前地质预报中要重点考虑地应力的影响因素,并指出地应力常常与断层及岩体破碎带息息相关;刘高等<sup>[8]</sup>在研究金川矿体的岩体力学参数及时空演化规律时指出,地应力是影响岩体结构的主要因素,最终可通过弹性波波速来综合反映;田家勇和王恩福<sup>[9]</sup>基于岩石的声弹理论研究了不同初始应力条件下沿不同方向的弹性波波速,表明岩石波速和应力之间存在特定的关系;谢和平等<sup>[10-11]</sup>指出高地应力特征是深部岩体赋存环境的本质属性之一,探索深地原位节理岩体应力波传播与衰减规律,是深地岩体动力学的主要课题之一。

川藏铁路所经地区属地中海—喜马拉雅地热带,热水(水)主要沿深大活动断裂带出露,存在明显的高地温现象<sup>[12-13]</sup>。在高地温地区开挖隧道,高温会引发炸药、雷管及导爆索等起爆药包性能稳定性下降,易出现瞎炮、哑炮、早爆和拒爆等问题,严重危及施工安全<sup>[14]</sup>。刘珣<sup>[15]</sup>依托川藏铁路一超高地温隧道,发现隧道环境温度高于 60℃时,普通导爆管——雷管出现软化现象,性能不稳定,现场多次出现拒爆。拉日铁路浅埋吉沃西嘎隧道最高岩温达 57℃,川藏铁路拉林段桑珠岭隧道岩温最高达 89.9℃,洞内环境温度最高达 56℃<sup>[16]</sup>。《爆破安全规程》GB 6722-2014 中规定<sup>[17]</sup>,高温爆破温度低于 80℃时,应选用耐高温爆破器材或隔热防护措施,温度超过 80℃时,必须对爆破器材采取隔热防护措施。正在规划建设的川藏铁路雅林段长大隧道也有类似高温现象,需提前做好预判工作。因此,高温环境下依赖炸药激震产生地震波的预报方法需深入分析。

基于以上认识,本文以常用的 TSP 法地质预报为例,分析该方法在高地温—高地应力隧道超前地质预报中可能存在的问题,并提出高地温—高地应力隧道超前地质预报的改进措施,以期对川藏铁路存在类似环境的隧道施工提供借鉴。

1 TSP 超前地质预报原理

TSP 系统自 1995 年被引进国内,已经被工程检测单位大量采用,甚至被纳入《铁路隧道超前地质预报技术规程》Q/RC 9217-2015<sup>[18]</sup>,一些业主也明确要检测单位必须使用 TSP。然而,目前很多学者对 TSP 的应用仍然颇有争议、褒贬不一<sup>[19]</sup>。

TSP 探测仪器是由瑞士 Amberg 测量技术公司

在 20 世纪 90 年代初开发的专门用于隧道超前地质预报技术,是一种属多波、多分量、高分辨率地震反射波探测方法,其探测原理如图 1 所示。工作时,采用设计上的 24 个小量炸药震源点(布置在地层或构造的走向与隧道轴相交成锐角的隧道边墙上)激发产生地震波;地震波在隧道中的岩体内传播,当遇到地震界面如断层、破碎带、大型溶洞等地质异常体时,一部分信号被反射回来,另一部分信号透射进入前方介质,而反射回来的地震波经岩体传播后到达接收传感器,通过接收传感器记录下来;经专业软件分析处理,可以获得 P、SH 和 SV 波的时间剖面、深度偏移剖面、反射层、岩石物理力学参数、各反射层能量大小等成果,以及反射层在探测范围内的 2D 或 3D 空间分布,根据反射波的组合特征及其动力学特征、岩石物理力学参数等资料来解释和推断地质体的性质(岩层软弱带、断层带、节理裂隙带、含水体等)。

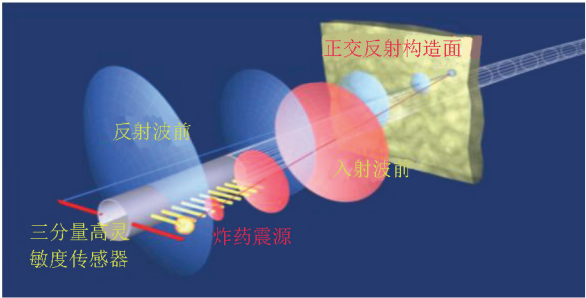


图 1 TSP 探测原理示意

Fig.1 Schematic diagram of TSP detection principle

TSP 系统探测距离一般可达掌子面前方 100 m,在坚硬岩石中甚至可以达到 150 m。王凯<sup>[20]</sup>通过正演和反演模拟认为 TSP 的有效预报距离最好控制在 120 m 以内。TSP 地震波反射法对于隧洞正前方与隧洞轴向近垂直或交角较大的地质构造探测效果较好,已积累了很多成功的经验,但对地下水、点状不良地质体的判别,溶洞的探测以及与隧洞轴向近平行或交角较小的地质构造的探测效果较差,与实际需求还有一定的差距。

TSP 测试系统已经从 TSP200 发展到 TSP203Plus 以及 TSP303 系统。从采集现场看,TSP303 之前的传感器安装需要 2 根长 2 m 的金属套管,传感器由 3 根杆拼接,不便于携带,成本高;最新的 TSP303 摒弃了使用 2 根钢管的保护措施,采集传感器由软质材料制成,检波器保护套可重复使用。然而,最主要的观测系统依旧是在隧道一侧边墙布设 24 个 1.5 m 深的炮孔,孔间距 1.5 m,需要施工方配合检测单位提前钻孔,采用炸药作为震源。

2 TSP 在 高 地 温—高 地 应 力 隧 道 预 报 中 存 在 的 问 题

2.1 高 地 温 隧 道 地 质 预 报 中 存 在 的 问 题

TSP 测试需布置 24 个炮孔,每个炮孔深 1.5 m,通常采用乳化炸药作为震源,在围岩较差洞段每个炮孔装填 100~150 g 乳化炸药,在围岩较完整洞段通常装填 50~75 g 乳化炸药,采用电雷管或塑料导爆管引爆,这种激震方式在常温隧道是可行的。然而,正在建设的川藏铁路沿线穿越二郎山、折多山、高尔寺山、沙鲁里山、芒康山、他念他翁山、伯舒拉

岭、色季拉山等 8 座高山,隧道埋深从数百米至 2 600m,线路所经地区属地中海—喜马拉雅地热带,热泉(水)主要沿深大活动断裂带出露,存在明显的高地温现象,已经探明的隧道有 69.87 km 的岩温均高于 60 ℃,如表 1 所示。根据《爆破安全规程》GB 6722-2014 中规定<sup>[17]</sup>,在 高 地 温 环 境 下 进 行 TSP 测 试 需 要 对 炸 药 和 雷 管 做 特 殊 处 理。与 此 同 时,反 复 在 高 温 环 境 下 测 试,仪 器 的 稳 定 性 是 否 能 得 到 保 障,这 是 TSP 在 高 温 环 境 中 测 试 主 要 存 在 的 问 题 之 一。

2.2 高 地 应 力 隧 道 地 质 预 报 中 存 在 的 问 题

高地应力是地质学概念,指岩石抗压强度与地应力的比值。高地应力对隧道工程造成的最典型灾

表 1 川藏铁路部分隧道高地温分布特征

Table1 Distribution characteristics of high geo-temperature in some tunnels of Sichuan-Tibet Railway

| 高温不良地质           | 雅安至昌都段/km | 昌都至林芝段/km | 雅安至林芝段合计/km |
|------------------|-----------|-----------|-------------|
| I 轻微(28~37 ℃)    | 51.086    | 38.31     | 89.396      |
| II-1 中等(37~50 ℃) | 33.12     | 27.66     | 60.78       |
| II-2 中等(50~60 ℃) | 3.4       | 2.28      | 5.68        |
| III 严重(>60 ℃)    | 2.0       | 1.41      | 3.41        |
| 37℃以上的段落合计       | 38.52     | 31.35     | 69.87       |

害为:对硬脆性岩体的岩爆和对软岩的洞室大变形。实际工程中岩体不但包含众多的节理、裂隙,而且都处于一定的地应力环境或外部荷载作用下,这些因素不仅影响岩体的力学特性,还对岩体的声学特性产生重大影响。川藏铁路高地应力特征十分明显。任洋等<sup>[21]</sup>通过水压致裂法实测川藏铁路雅安—新

都桥段地应力(图 2),发现测区最大水平主应力均大于最小水平主应力和垂直应力,埋深 1 300 m 时实测最大水平主应力值大于 51 MPa,最大主应力值随埋深具有线性关系。川藏铁路雅林段新建隧道 72 座,总长 851.48 km,沿线隧道最大埋深达 2 600 m,深埋长大隧道面临的高地应力问题不可避免。

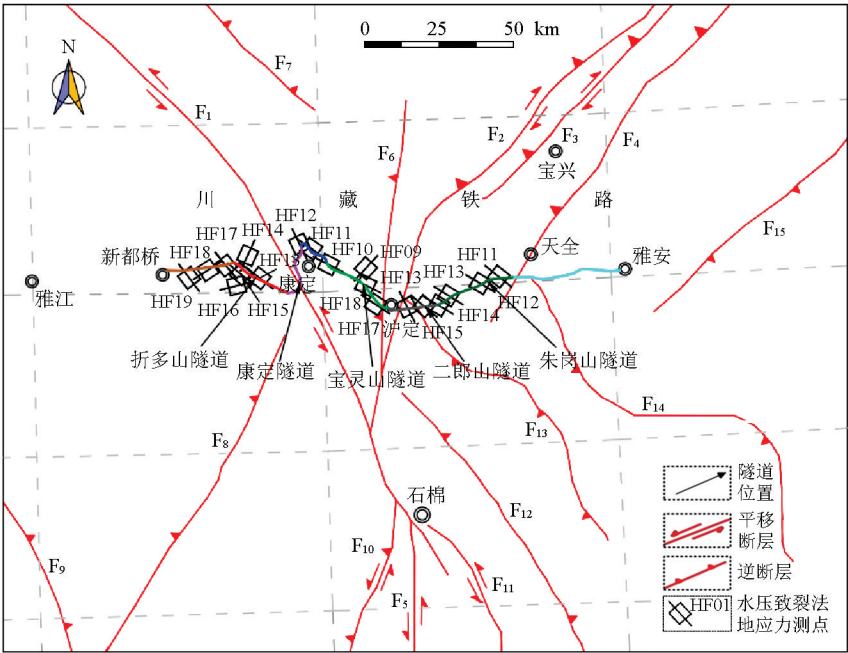


图 2 川藏铁路雅安至新都桥段实测地应力点分布<sup>[21]</sup>

Fig.2 Distribution of in-situ geostress measurement boreholes in Ya'an-Xinduqiao section of Sichuan-Tibet railway<sup>[21]</sup>

在赋存高地应力隧道的硬脆性岩体中探测, TSP 测试所需的 24 个激震孔易成孔, 参考已有文献资料, 在未开挖洞段, 高地应力的存在一方面对岩体的波速影响较大, 测试时少量炸药激发产生的地震波沿着已开挖隧道边墙传播, 也就是从低波速区向高波速区传播, TSP 在数据处理时是否有这方面的考虑值得研究。另一方面, 已开展的由多个水泥砂浆试件组成的可模拟节理分布和施加不同地应力水平的组合模型试验(图 3)中, 模型尺寸为长×宽×高=180 cm×80 cm×25 cm, 观察到地应力对岩体中裂纹的扩展有明显的导向作用, 即裂纹主要沿地应力较大的方向扩展, 在地应力较小的方向影响较小。一些学者也认为, 地应力对炸药爆破后产生的地震波具有导向作用<sup>[22-23]</sup>, 在地应力较大的方向地震波传播较快, 换言之, 地震波的传播方向受地应力影响较大。而在隧道高地应力段, 岩爆预测最关注的是地

质灾害, TSP 测试掌子面前方的波速对已开挖段波速依赖性很大, 难以将 TSP 所获得的波速反演出地应力。所以, TSP 在发育岩爆地段的隧道应用还有待深入探讨。

在 高 地 应 力 软 岩 地 区, TSP 测 试 布 孔 一 般 由 施 工 单 位 提 前 1~2 d 打 孔, 在 围 岩 级 别 较 差 的 洞 段, 如 V 级 围 岩, 由于测试衔接不够紧凑, 存在易塌孔、水封效果差等问题, 直接影响数据采集精度, 理论上可以补孔, 而在工程建设工期紧的条件下, 会影响到后续的放炮、采集等工作, 一般难以满足重新打孔要求。其次, 在地质条件较差的隧道工程中, 施工方案往往采用两台阶或者多台阶的开挖方式, 上台阶的隧道轴向距离一般仅十几米, 二衬和初支距离非常近, 尤其在软岩大变形隧道, 大偏移距的地震勘探技术不适用于隧洞工程边墙, 难以满足 TSP 要求的 56 m 测线长度。

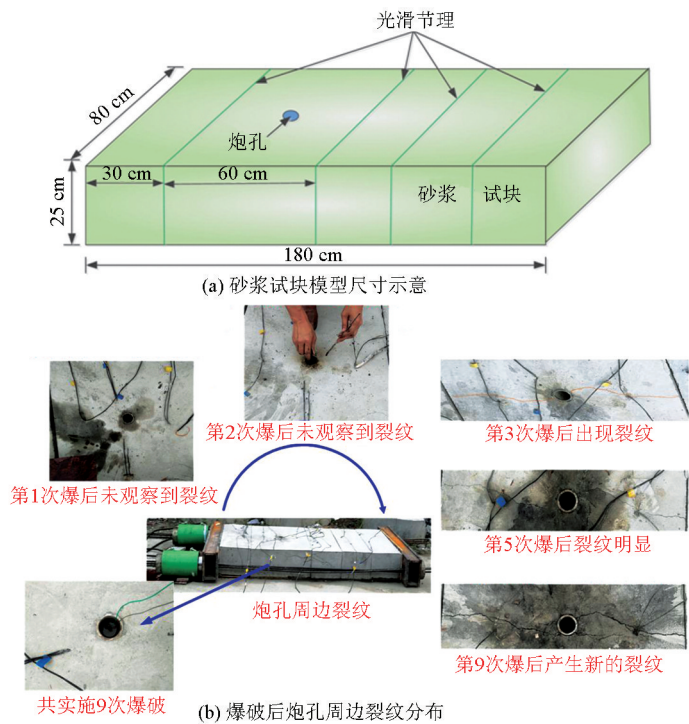


图 3 不同地应力条件节理岩体爆破裂纹传播试验

Fig.3 Crack propagation experiment of jointed rock mass under different in situ stress

3 改进措施

针对 TSP 在 高 地 温 — 高 地 应 力 隧 道 超 前 地 质 预 报 中 存 在 的 上 述 问 题, 笔 者 结 合 大 量 的 现 场 测 试, 提 出 以 下 几 点 改 进 措 施。

3.1 研制绝热保温袋起爆药包

针对高地温隧道, 首先分析高地温隧道岩温分布规律, 总结高温环境下起爆药包拒爆、哑炮及爆速

衰减影响关键因素。参考露天煤矿高温爆破技术标准及室内阻水隔热材料试验, 研制绝热保温袋起爆药包, 研制产品需符合经济环保要求, 同时需满足快速装药以及高温爆破的安全技术要求, 在安全准爆条件下研究并确定准确可控的装药爆破技术参数、作业工艺、时间和流程, 制定涉及高地温爆破操作规程和安全技术措施, 确保高地温隧道超前地质预报的快速实施。课题组在西南地区某爆炸与冲击实验室进行了高温环境下起爆药包的试验研究(图 4)。

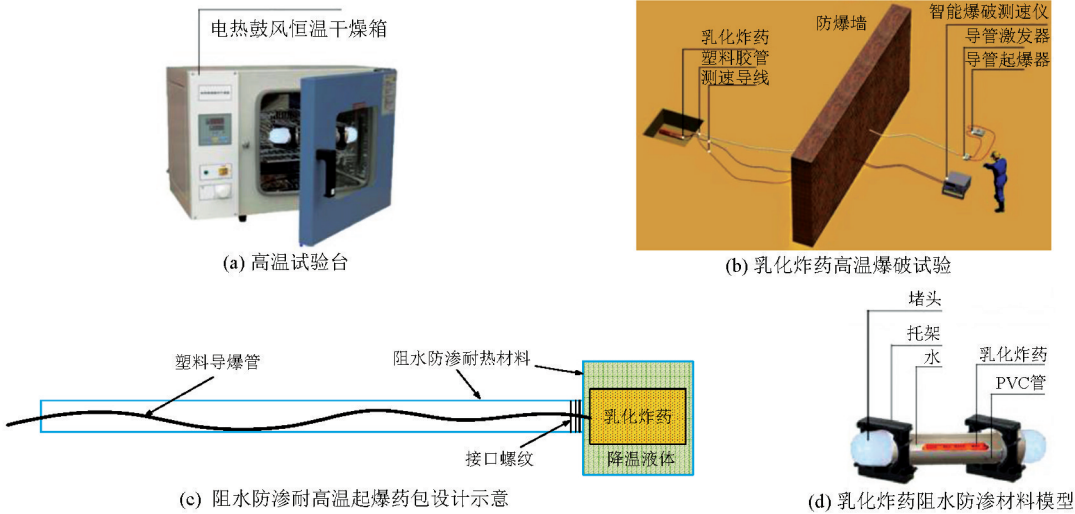


图 4 绝热保温袋起爆药包材料试验

Fig.4 Test of initiating charge pack material for thermal insulation bag

3.2 改变震源激发方式

炸药爆破一方面存在安全隐患,已经发生过 TSP 作业造成接线人员伤亡的工程案例;另一方面,进入 21 世纪以来,世界上各类恐怖活动呈多发态势,在一些地区,爆炸袭击愈演愈烈,在此背景下,势必造成雷管、炸药等火工用品的监管更加严格,审批程序需进一步规范,审批难度将增加。因此,应摒弃炸药激震,采用锤击或电火花激震的方式。如:中铁西南科学研究院有限公司自主研发的隧道超前地质预报仪——HSP (horizontal sonic profiling) 水平声波剖面法采用锤击震源,该公司研发的新型的 ZDF-3 (ZhiliuDian Fire-3) 型电火花也可作为震源;石家庄铁道大学的娄国充团队<sup>[24]</sup>构建的高性能定向三维超前地质预报技术,也是采用易操作的锤击震源。

3.3 建立基于多元地质信息的智能工程评价体系

通过电脑凿岩台车钻孔作业时监测的钻进参数、数码成像技术、TSP、探地雷达等超前地质预报技术,对掌子面地质情况进行智能化采集;研发隧道施工工期围岩快速分级设备信息系统,实现隧道掌子面前方 0~3 m 范围的岩体完整性系数、单轴抗压强度等围岩分级参数的快速获取,达到施工工期围岩快速分级目的;采用数量化理论,建立现场多信息综合评价模型,运用专家知识系统比较分析现场多信息综合评价模型,实现围岩信息的智能判识和超前地质预报;采用双目相机成像及 3D 扫描技术实现隧道变形自动化监测系统,结合围岩和结构的变形控制标准,对围岩稳定性进行智能识别;基于围岩信息、稳定性智能采集与判识数据,建立基于多元地质信息的智能工程评价体系。

3.4 新方法新技术的推广应用

隧道作为系统工程,开挖岩体与周围环境间存在着能量交换,在隧道实际施工中往往易忽略已开挖段所揭露岩体的自然属性与现场监控量测信息之间的内在关联,而这恰恰对后续未开挖段施工、设计变更与否等有重要指导意义<sup>[25]</sup>。采用机器学习,数据挖掘、神经网络,与预报结果相结合,全方位、多角度对预报结果进行实时更新。同时,也应推广多种预报方法,如:多源地震干涉法<sup>[26-27]</sup>、具有聚焦特性和连续扫描探测方式的新型雷达<sup>[28]</sup>,以及 TGP、TRT、TST 等,不能盲从一种方法。

3.5 适用于 TBM 的超前地质预报

超长深埋隧道建议不设或少设斜井或竖井,采取以 TBM (tunnel boring machine) 法为主的“TBM+钻爆法”修建模式<sup>[1]</sup>。未来,TBM 法在隧道建设中将会得到大力推广,开发适应于 TBM 的超前地质预报设备及研究方法,尚未见到 TSP 在这方面的报道。刘斌等<sup>[28]</sup>提出利用三维地震超前预报技术、三维激发极化法及机器学习手段的综合方法来预测岩体主要参数,该方法适用于 TBM 施工,研发的 HSP 型隧道地质预报仪可安装在 TBM 刀盘上,通过掘进机刀盘切割岩体产生的振动信号进行数据分析,目前已在引汉济渭工程及乐山至西昌高速大凉山 1 号特长隧道进行了应用。

3.6 预报工作组织管理

TSP 技术交底不明确。按照目前的 TSP 前次测试与下次测试搭接 10 m 的要求,TSP 探测要求的 24 个炮孔和至少 2 个接收器孔大多由作业公司提前完成,实际上,作业公司的管理者并不清楚 TSP 的测

试关键细节,往往出现 24 个炮孔部分布设在上台阶,部分布设在下台阶,仰拱被挖之后,接收孔要么太高要么太低。换言之,炮孔和接收孔不在同一高度的现象在实际工作中不在少数。其原因在于检测公司与甲方的技术交底难以通知到作业公司,加之施工方本身的人员流动性大,作业配合人员不固定,增加了数据采集的难度,降低了采集精度。

建议将高风险铁路隧道的超前地质预报费用从安全生产专项费中剥离,并将超前地质预报引起隧道建造成本增加的费用纳入工程造价标准体系管理。

## 4 结论

TSP 在高地温—高地应力隧道超前地质预报中主要存在两方面的问题,高岩温易造成炸药拒爆、哑炮和瞎炮,在应力区,地应力对地震波传播影响较大;这两方面的问题对 TSP 数据采集精度及判释影响较大。针对这些问题,提出了 6 点改进措施,最终目标是使超前地质预报方法数据可靠、精度高、造价低、易掌握,同时提升施工中的地勘技术和装备水平,将未知变为可知,将不确定变为可控。

## 参考文献 (References):

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设,2017,37(2):123-134.  
Hong K R.Development and prospects of tunnels and underground works in China in recent two years [J].Tunnel Construction, 2017,37(2):123-134.
- [2] 钱七虎.隧道工程建设地质预报及信息化技术的主要进展及发展方向[J].隧道建设,2017,37(3):251-263.  
Qian Q H.Main developments and directions of geological prediction and informatized technology of tunnel construction [J].Tunnel Construction,2017,37(3):251-263.
- [3] 王洪勇.综合超前地质预报在圆梁山隧道中的应用[J].现代隧道技术,2004,41(3):55-61.  
Wang H Y.Comprehensive advance geology prediction adopted in Yuanliangshan tunnel [J].Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(3):55-61.
- [4] 曲海锋,刘志刚,朱合华.隧道信息化施工中综合超前地质预报技术[J].岩石力学与工程学报,2006,25(6):1246-1251.  
Qu H F,Liu Z G,Zhu H H.Technique of synthetic geologic prediction ahead in tunnel informational construction [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(6):1246-1251.
- [5] 刘俊,韩立军,孟庆彬.TBM 隧道综合超前地质预报及其在阳灵隧道的应用[J].山东大学学报:工学版,2019,49(4):51-60.  
Liu J,Han L J,Meng Q B.TBM comprehensive advanced geological prediction in a tunnel and its application in Yangling Tunnel [J].Journal of Shandong University:Engineering Science,2019,49(4):51-60.
- [6] 刘阳飞.超特长隧道综合超前地质预报工法研究与应用[D].成都:成都理工大学,2016.  
Liu Y F.Comprehensive advanced geological prediction method for super long tunnel and its application [D].Chengdu:Chengdu University of Technology,2016.
- [7] 徐志伟.地应力实测对地下灾害的超前预报与分析[C]//北京:首届全国青年岩石力学学术研讨会论文集,1991.  
Xu Z W.Advance forecast and analysis of underground disaster based on ground stress measurement [C]//Beijing:Proceedings of the First National Youth Symposium on Rock Mechanics,1991.
- [8] 刘高,韩文峰,李雪峰.金川矿山围岩动态演化及其力学参数研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(s2):2588-2594.  
Liu G,Han W F,Li X F.Dynamic evolution and mechanical parameters of surrounding rocks in Jinchuan Nickel mine [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(s2):2588-2594.
- [9] 田家勇,王恩福.基于声弹理论的地应力超声测量方法[J].岩石力学与工程学报,2006,25(s2):3719-3724.  
Tian J Y,Wang E F.Ultrasonic method for measuring in-situ stress based on acoustoelasticity theory [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(s2):3719-3724.
- [10] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.  
Xie H P.Research framework and anticipated results of deep rock mechanics and mining theory [J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(2):1-16.
- [11] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深地科学领域的若干颠覆性技术构想和研究方向[J].工程科学与技术,2017,49(1):1-8.  
Xie H P,Gao F,Ju Y,et al.Novel idea and disruptive technologies for the exploration and research of deep earth [J].Advanced Engineering Sciences,2017,49(1):1-8.
- [12] 郑宗溪,孙其清.川藏铁路隧道工程[J].隧道建设,2017,37(8):1049-1054.  
Zheng Z X,Sun Q Q.Sichuan-Tibet railway tunnel project [J].Tunnel Construction,2017,37(8):1049-1054.
- [13] Lu C F,Cai C X.Challenges and countermeasures for construction safety during the Sichuan-Tibet railway project [J].Engineering, 2019,5:833-838.
- [14] 刘金松.川藏铁路高地温隧道施工关键技术研究[J].施工技术,2018,47(1):100-102.  
Liu J S.Key construction technologies research on high geothermal tunnel on Sichuan-Tibet railway [J].Construction Technology, 2018,47(1):100-102.
- [15] 刘珣.川藏铁路高地温隧道建设技术[J].铁道建筑,2019,59(9):53-56.  
Liu X.Construction technology of tunnels in area of high geotemperature for Sichuan-Tibet railway [J].Railway Engineering,2019,59(9):53-56.
- [16] 焦国锋.拉萨—日喀则铁路吉沃西嘎隧道高地温预测[J].铁道建筑,2013,53(7):74-76.  
Jiao G F.High geo-temperature prediction of Jivoxiga tunnel in Lhasa-Xigaze railway [J].Railway Engineering,2013,53(7):74-76.
- [17] 中华人民共和国国家标准.GB 6722-2014 爆破安全规程[S].

- 北京:中国标准出版社,2014.
- National Standards of the People's Republic of China.GB 6722-2014 Safety Regulations for Blasting [S].Beijing:China Standard Press,2014.
- [18] 中国铁路总公司.Q/RC 9217-2015 铁路隧道超前地质预报技术规程[S].北京:中国铁道出版社,2015.
- China Railway Corporation.Q/RC 9217-2015 Technical Specification for Geology Forecast of Railway Tunnel [S].Beijing:China Railway Publishing House,2015.
- [19] 刘云祯.TGP 隧道地震波预报系统与技术[J].物探与化探,2009,33(2):170-177.
- Liu Y Z.TGP tunnel seismic wave forecast system and its technology [J].Geophysical and Geochemical Exploration,2009,33(2):170-177.
- [20] 王凯.基于模型正反演的 TSP 有效预报距离研究[J].铁道勘察,2019,45(6):59-63.
- Wang K.Research on detection range of TSP method based on forward modeling and inversion [J].Railway Investigation and Surveying,2019,45(6):59-63.
- [21] 任洋,王栋,李天斌,等.川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):65-76.
- Ren Y,Wang D,Li T B,et al.In-situ geostress characteristics and engineering effect in Ya'an-Xinduqiao section of Sichuan-Tibet Railway [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(1):65-76.
- [22] Nicholls H R,Duvall W L.Pre-splitting rock in the presence of a static stress field [R].U.S. Dept. of the Interior,Bureau of Mines,1966.
- [23] Simha K R Y,Fourney W L,Dick R D.Studies on explosively driven cracks under confining in-situ stresses:Rock Mechanics in Productivity and Protection [C]//Illinois:Proceedings of the Twenty-Fifth Symposium on Rock Mechanics. Evanston,1984.
- [24] 娄国充,孙志涛,满令聪.三维地震波定向超前地质预报技术试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(s1):2733-2740.
- Lou G C,Sun Z T,Man L C.Experimental research on 3D geological directional seismic prediction during tunnel construction [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(s1):2733-2740.
- [25] 贺鹏,李术才,李利平,等.基于数据挖掘的隧道围岩变形响应预测与动态变更许可机制[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):2940-2953.
- He P,Li S C,Li L P,et al.Prediction of deformation response in surrounding rock of tunnels and permit mechanism of dynamic change based on data mining [J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2017,36(12):2940-2953.
- [26] 汪旭,孟露,杨刚,等.隧道超前地质预报多源地震干涉法成像结果影响因素研究[J].现代隧道技术,2019,56(5):58-66.
- Wang X,Meng L,Yang G,et al.On influencing factors of the tunnel geological prediction results obtained by multi-source seismic interferometry [J].Modern Tunnelling Technology,2019,56(5):58-66.
- [27] 吴丰收,李静,花晓鸣,等.基于多源地震干涉法的隧道超前地质预报技术数值模拟研究[J].现代隧道技术,2018,55(3):92-97.
- Wu F S,Li J,Hua X M,et al.Numerical simulation of advanced geological forecasting based on multi-source seismic interferometry [J].Modern Tunnelling Technology,2018,55(3):92-97.
- [28] 刘斌,李术才,李建斌,等.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:工学版,2016,46(6):105-112.
- Liu B,Li S C,Li J B,et al.Integrated acquisition method of adverse geology and rock properties ahead of tunnel face in TBM construction tunnel [J].Journal of Shandong University:Engineering Science,2016,46(6):105-112.

## Problems and improvements of Tunnel Seismic Prediction in geological prediction of tunnels under high geotemperature and high in-situ geostress

FAN Zhan-Feng<sup>1</sup>, CAI Jian-Hua<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>3</sup>

(1.School of Architecture and Civil Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China; 2.China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731, China; 3.China Railway 18<sup>th</sup> Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** The Sichuan-Tibet Railway under construction has a large number of tunnels under high geotemperature and high in-situ geostress. How to improve the accuracy of advanced geological prediction of these tunnels is a major difficulty in railway construction. Taking the Tunnel Seismic Prediction (TSP) method for advanced geological prediction as an example, analyses reveal that there are two major problems in the detection of the tunnels. One is that the use of emulsion explosives and plastic detonating tubes in blastholes under a high rock-temperature is liable to cause misfires, thus affecting data acquisition. The other is that the wave velocity differences between the excavated and unexcavated areas of tunnels under high in-situ geostress are not considered in data processing. Targeting these problems, this paper proposes six improvement measures, namely researching and developing detonation packs with a thermal insulation bag, establishing intelligent engineering assessment systems based on multiple geological information, changing the models of shock initiation of the TSP, popularizing new technologies and methods of advanced geological prediction, researching and developing advanced geological prediction systems suitable for Tunnel Boring Machines (TBMs), and improving the organizational management of geological prediction. All these measures can provide references for efficient detection of advanced geological prediction of tunnels in areas with high geotemperature and high in-situ geostress.

**Key words:** geological prediction; tunnel; high geotemperature; high in-situ stress; seismic wave

(本文编辑:叶佩)