

# 综合超前地质预报在西气东输二线隧道工程中的应用

胡文君<sup>1</sup> 王进<sup>1</sup> 胡道华<sup>1</sup> 马红<sup>2</sup>

1. 中国石油工程设计有限公司西南分公司 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院

胡文君等. 综合超前地质预报在西气东输二线隧道工程中的应用. 天然气工业, 2010, 30(5): 87-91.

**摘 要** 西气东输二线管道全长超过 8 000 km, 西起新疆霍尔果斯, 东至上海, 南至广州、香港, 是我国石油天然气长输管道建设史上的一座里程碑, 全线共设置隧道 60 余座, 隧道处的地质条件复杂。为此, 在西气东输二线隧道工程建设中, 综合分析 TSP203 超前地质预报仪、超前钻孔、红外探水和地质素描等多种超前地质预报方法的优缺点, 结合工程实际, 形成了一套较完整的综合超前地质预报技术体系, 为制订相应的施工方案、加快施工进度和确保施工安全提供了重要的技术保障。介绍了该技术系统的实施流程, 其技术特色是将长、短距离的地质预报与物探、钻探等预报方法相结合, 进行综合超前地质预报。工程实例经济分析表明: 该技术体系的实施, 不仅缩短了工期, 还大大节约了工程投资成本, 具有较好的推广应用价值。

**关键词** 西气东输二线 综合超前地质预报 TSP203 超前地质预报仪 超前钻孔 红外探水 地质素描 工期投资

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2010.05.022

## 1 实施超前地质预报的必要性和目的

西气东输二线管道工程西起新疆霍尔果斯, 南下广州, 东至上海, 由 1 条干线及 8 条支线组成, 全长超过 8 000 km, 穿越黄河、长江, 穿越黄土地区、江南丘陵等各种地形地貌, 全线共设置隧道 60 余座。由于西气东输二线隧道数量众多, 工期紧, 勘察任务重, 隧道工程采用在初勘的基础上开展施工图设计的模式。

### 1.1 超前地质预报的必要性

国内外大量的隧道工程建设实践表明, 由于地质勘察精度、经费、工期等诸多条件的限制, 根据地质勘察资料做出的设计与实际不符的情况屡有发生, 由此带来的隧道洞内塌方、涌水、涌泥、涌沙、岩爆、瓦斯爆炸等灾害时有发生, 给隧道施工造成极大的危害<sup>[1]</sup>。因此, 在隧道施工期间, 采用各种技术手段对隧道掌子面前方地质条件进行及时准确的预测, 是提前采取预防措施、避免灾害发生、减少损失、保证隧道施工安全的需要。

西气东输二线隧道工程在初勘基础上开展施工图

设计, 由于其勘察深度不够, 设计文件上的地质情况和实际开挖的围岩不符在所难免。因此在施工期间实施超前地质预报非常必要。

### 1.2 超前地质预报的目的

实施超前地质预报能保证隧道施工安全, 以减少或避免因涌泥、涌水、涌沙而造成人员及设备损伤、工期延长和投资增加等, 可以节约大量资金; 可以减少很多不必要的安全防护措施。实施超前地质预报是隧道施工根据实际地质、水文条件变化及时调整施工方法和采取相应技术措施的需要, 是完善设计地质资料、优化施工方案、指导施工决策和保证施工人员和设备的安全的需要, 是隧道施工过程中根据实际地质条件进行隧道围岩级别确定和设计变更的依据, 是隧道运营阶段地质灾害治理的依据。

## 2 隧道施工地质灾害预报方法

国外隧道地质超前预报技术较成熟, 我国隧道地质超前预报研究始于 20 世纪 50 年代, 20 世纪 70 年代才真正开始了地质超前预报的研究和应用。目前国

内外超前地质预报的方法主要有:地质素描、导坑超前探测、超前钻探、TSP203 超前地质预报系统和 HY-303 红外探测等<sup>[2]</sup>。

## 2.1 地质素描

地质素描是最早开展的超前地质预报法,也是其他超前地质预报方法的基础。其原理是将隧道所揭露的地层岩性、地质构造、结构面产状、地下水出露点位置、出水状态、出水量、煤层和溶洞等资料准确记录下来,随着开挖面的延伸,不停地观察洞壁和掌子面上地质特征的改变,结合已有勘测资料,进行隧道开挖面前方地质条件的预测,为围岩级别的改变提供依据。该方法设备简单、操作方便、不占用隧道施工时间,提交资料及时,费用低,但需要地质知识水平较高的专业人员来完成。

## 2.2 超前导坑法

超前导坑法是指根据超前施工的平行隧道或导坑所遇地质情况,推测隧道将遇到怎样的地质情况,是隧道施工期地质预报的一种重要方法,特别是当两平行隧道间距较小时预报效果更佳。超前导坑法是我国隧道施工早期采用的隧道施工期地质超前预报方法。

## 2.3 风钻超前探测

风钻超前探测是利用风钻在隧道掌子面钻水平小孔径的浅孔以获取地质信息的一种方法。它是岩溶发育区对超前地质钻探的一种重要补充方法,因其数量较多,有时效果是非常明显的。与超前地质钻探相比,它具有设备简单、操作方便、费用低、占用隧道施工时间短等优点,可与爆破孔同时施工,其钻进深度较爆破孔深 2~6 m,其缺点是孔浅,且不能取岩心。

## 2.4 超前钻探

采用超前钻探进行掌子面前方地质超前预报,是超前地质预报方法中最直接的方法。其通过钻孔钻进速度测试和所采取的钻孔岩心的观察及相关试验获取隧道掌子面前方岩体的强度指标、可钻性指标、地层岩性情况、岩体完整程度指标及地下水状况等诸多方面的直接资料。目前,国内采用这种方法进行超前地质预报,主要在水工隧道、长大铁路和公路隧道工程中,国外采用已较为普遍。采用此方法不仅可以确定隧道掌子面前方地质情况,而且可以起到探水的作用<sup>[3-4]</sup>。

## 2.5 TSP203 超前地质预报系统

TSP203 是目前公认为预报效果较好的仪器,其原理是利用地震波在不均匀地层的界面产生反射波的特征和信号接收的时间等参数来判断前方的地质变化。TSP 属于长距离超前地质预报,其有效深距可达 150~300 m,预测距离在 100 m 左右是比较准确的。

在不良地质体定位上,最大分辨率不小于 1 m;位置判别精度约为 90%,其规模判别精度可达 85%;TSP203 型仪器可辨识出断层、有无地下水、多水、少水、弱富水带和强富水带等,而对突涌水量和水压的定量预测,仍需结合其他探水手段进行<sup>[5]</sup>;探测成果准确度取决于准确的操作与图像解释技术。

## 2.6 红外探测

HY—303 红外探水仪,能探测 20~30 m 范围内的地下水状况。基本原理:当掘进前方 30 m 范围内存在含水构造或溶洞时,前方灾害源产生的红外异常场,必然会传播到掘进后方,因而在掘进后方隧道的侧壁上能提前发现灾害源产生的红外异常场。其特点为:①距离短,一般为 35 m;②只定性告知 35 m 范围内有无水,至于水压、水量、具体哪个里程则探测不出;③适用于任何地层中定性判断探测点前方“有没有水”及水体存在方位;④仪器小巧轻便,操作简单,可实现全空间全方位探测;⑤资料分析简洁、快速、直观;⑥基本不占用隧道施工时间。

# 3 西气东输二线综合超前地质预报系统

## 3.1 综合超前地质预报系统

隧道工程属于复杂的地下工程,采取一种地质预报方法是不可靠的,宜采取多种预报手段相结合的综合超前预报系统,多管齐下,优化组合,相互补充,以达到提高成果解译水平、地质预报精度和预报探测成果的利用效率的效果,就能及时反馈指导设计与施工。准确的超前地质预测与预报技术是优化设计方案和确保不良地质地段施工安全的有力保证。为保证西气东输二线隧道工程的安全顺利完工,隧道施工过程中,采用综合超前地质预报系统,其本质特色是将长、短距离的地质预报与物探、钻探等预报方法有机结合起来。

要安全顺利地通过各类不良地质段,关键是对不良地质体进行准确预测,然后根据预测结果制订切实可行的技术预案。日本青函海底隧洞(总长 53.85 km)成功的经验之一,就是以综合手段做了大量的施工地质预报工作,确保了施工安全和工期<sup>[6]</sup>。

## 3.2 西气东输二线超前地质预报实施方案

西气东输二线隧道工程综合超前地质预报系统具体实施流程见图 1。

### 3.2.1 开挖围岩研究

该方法是隧道所在地区的地质分析与宏观预报,这是超前地质预报的第一步重要工作程序,主要包括区域地质资料收集、对隧道设计说明书进行分析与研

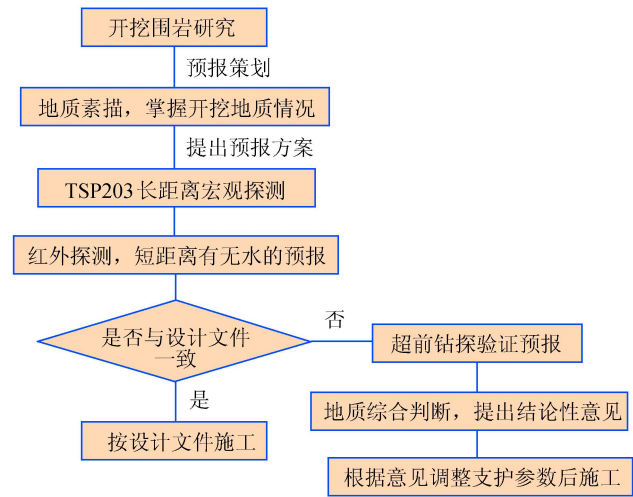


图 1 综合超前地质预报流程图

研究和地表地质调查与分析,在地质分析的基础上,进行宏观预报。

3.2.2 地质素描

该方法属于施工过程中的短距离地质预报方法,是最通用的短期超前地质预报方法,绘制地质素描图,并做出开挖面前方较短距离内的岩体稳定性分析,根据开挖围岩的情况和岩体变化来推断前方地质变化趋势,编制地质预测报告,提出地质预报方案。该方法被西气东输二线施工标段全程采用。

3.2.3 TSP203 长距离宏观探测

该方法属于施工过程中的长距离地质预报方法,在宏观预报的指导下,主要应用 TSP 203 探测、断层参数预测和地面地质体投射等技术手段,对隧道隧洞洞体前方 100~150 m 不良地质体进行长距离超前地质预报。TSP203 超前预报示意图如图 2 所示。该方法预报结论相对可靠,30 min 即可以做好准备工作,测量时间小于 90 min,操作简单,对施工干扰小,但其测量出的结果需要采用超前钻探进行验证。

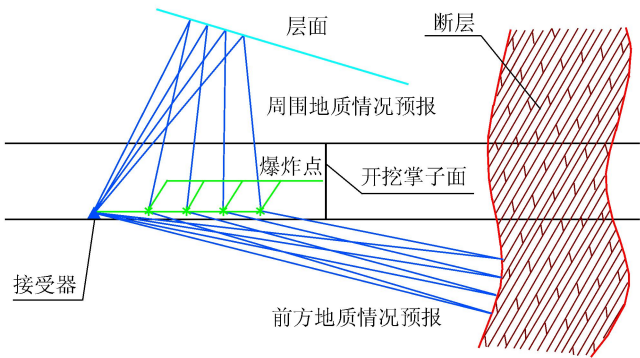


图 2 TSP203 超前预报示意图

3.2.4 红外探测

该方法属于施工过程中的短距离地质预报方法, HY—303 红外探水仪主要用于隧道的含水地段和不良地质地段,根据施工揭示的地质信息和 TSP 长期预报的结果,在必要的地段进行加强。HY—303 红外探水超前预报示意图如图 3 所示。该方法具有测量快速、不占用施工时间的特点,可有效得出前方是否有含水水体结论,但其不能测量水量大小,无法确定含水水体距工作面的距离,因此需要采用超前钻探进行验证。

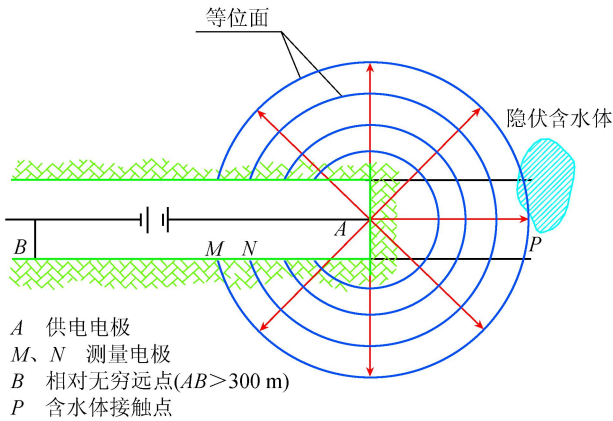


图 3 红外探水示意图

3.2.5 判断

根据地质素描预测报告及 TSP203 长距离宏观探测、红外探测仪的探测结果和设计文件的围岩情况进行对比,如果结果一致则按设计文件执行,预报完毕;如果其结果和设计文件的围岩情况不一致,则需采用超前钻探验证其结果。

3.2.6 超前钻探验证预报

该方法属于施工过程中的短距离地质预报方法,需要采用超前钻孔进行验证。由于西气东输二线隧道断面较小,沿掌子面打超前水平探孔 1 个。超前钻探示意图如图 4 所示。

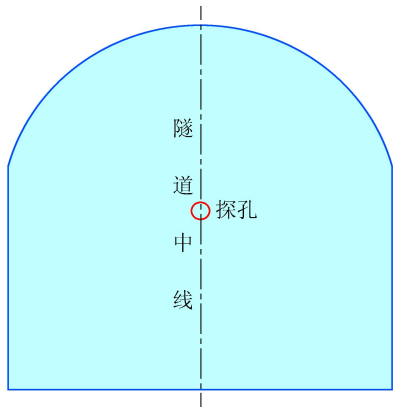


图 4 超前钻探示意图

通过对钻孔取样分析,判断出地层变化、岩性差异和地层含水量等信息,在开挖前探明前方地质水文情况及岩层的富水情况,并进一步核实围岩分级,以便在施工中采取针对性的工程措施。

西气东输二线隧道工程超前钻探技术要求如下:①钻孔位置:在掌子面布置 1 个钻孔,位于掌子面中心;②深度(长度)要求:钻孔深度(水平长度)原则是能长则尽量长,一般为 35 m,前后两次搭接(重复)长度 5 m;③孔径要求:76 mm;④为了判别岩石质量指标(RQD)值,要求采用 76 mm 双管单动金刚石钻头取心;⑤钻探记录须及时、详细、清晰,认真记录钻进工程中的所遇到的各种情况,对钻进速度变化情况、涌水位置、涌水量的变化、涌水浑浊程度、岩心破碎程度、岩心颜色变化及卡钻现象等情况要进行准确记录;⑥钻探资料及时整理,并请地质人员进行分析。

根据钻探结果综合判断,提出结论性意见,根据意见调整支护参数后施工。

### 3.2.7 综合超前地质预报的成果

西气东输二线西段隧道于 2008 年 7 月开工,共实施 4 次 TSP 超前地质预报,其中冰沟隧道 1 次,上河沿隧道 3 次,根据信号的强弱和地质情况,每次预报的距离长短从 80 m 到 100 m 不等,地质好、信号强的地段预报的距离稍长一些,超前钻探共实施了 6 次。冰沟隧道掘进至 K0+68 m 处时,TSP 地质预报前方围岩情况与设计文件中的围岩情况不符,从 K0+68~K0+103 m 段做了一次超前钻探,从钻孔取出来的围岩样品显示该段岩层为碳质泥岩,呈暗黑色,含有机质,呈塑胶状,遇水即软,太阳一晒即硬,基本不成岩,经业主、EPC、设计、监理和施工五方现场确认,围岩定性为 V 级,原设计文件为 IV 级,及时调整了施工支护方案,保证施工安全。西段隧道已于 2008 年 9 月竣工,比计划提前 2 个月竣工。

西气东输二线东段隧道自从 2009 年 6 月开工以来,截至目前共实施 TSP 超前地质预报 8 次,从预报的结果和掌子面开挖揭示的围岩情况来看,地质预报的准确率超过 80%,超前钻探实施了 6 次<sup>[7-8]</sup>。2009 年 10 月 12 日,亚桂山隧道出口端掘进至 K1+615~K1+612 m 段时,从掌子面开挖揭示的围岩情况来看,岩层为泥岩,有裂隙水,局部坍塌,设计文件中该段为 IV 级围岩,TSP 地质预报前方围岩与设计文件不符,业主、EPC、设计、监理和施工五方在现场确认后,要求实施超前钻探进行验证。自 K1+612~K1+577

m 段实施了 1 次超前钻探,从超前钻探取出的围岩样品来看,K1+612~K1+595 m 段围岩完整性差,基本破碎,节理、裂隙很发育,结构呈破碎状态,裂隙中充填一定量的泥,围岩定性为 V 级;K1+595~K1+590 m 段局部破碎,但围岩已有好转迹象,围岩介于 IV 级~V 级之间,定性为过渡段;K1+590~K1+577 m 段围岩为中风化中细粒石英砂岩,岩体结构整体性和完整性较好,围岩定性为 IV 级,与设计文件一致。

司前 1<sup>#</sup>隧道进口侧施工至 K0+260 m 时,开挖掌子面处围岩为强风化花岗岩,节理裂隙发育,结构松散,围岩破碎,孔隙较大,拱顶往下滴水呈线状,并听到水流的哗哗声,稳定性差。利用 HY-303 红外线探水仪探测出前方存在隐伏含水层,自 K0+260~K0+295 m 实施了超前钻探,成功探测到掌子面前方 20 m 处有突水,及时调整施工支护参数,对开挖掌子面前方进行超前注浆封堵,有效避免了隧道内涌水涌泥地质灾害的发生。

## 4 实施综合超前地质预报效益分析

在保证工程安全的情况下,对比初步设计和施工图设计,西气东输二线隧道工程初步设计阶段采用单一的超前钻探进行地质预报,初步设计阶段实施超前地质预报措施的工期及投资见表 1;西气东输二线隧道工程施工图设计阶段采用综合超前地质预报,施工图设计阶段实施综合超前地质预报措施的工期及投资见表 1<sup>[9-12]</sup>。

从表 1 可知,中国石油工程设计有限公司西南分公司(CPE-SW)设计段的隧道群利用综合超前地质预报后,在缩短工期和降低工程投资方面效果显著,工期累计缩短 866 d,工程投资累计节约 649.9 万元。

## 5 结论

西气东输二线隧道工程建立了完善的综合超前地质预报系统,即把 TSP 超前地质预报、超前钻探、红外探水和地质素描等多种超前地质预报方法相结合,进行综合超前地质预报,取得较好效果。

1)研究与实践证明,西气东输二线隧道工程创新性地提出综合超前地质预报系统,对油气管道隧道的设计和施工具有较好的指导意义。

2)综合超前地质预报系统在保证工程安全的情况下,缩短了工期,节约了工程投资。

3)西气东输二线隧道工程在初勘的基础上,开展

表 1 超前地质预报工期投资统计表

| 隧道名称              | 初步设计阶段 |       |         | 施工图阶段    |      |       | 缩短工期/<br>d | 降低投资/<br>万元 |
|-------------------|--------|-------|---------|----------|------|-------|------------|-------------|
|                   | 地质预报措施 | 工期/d  | 投资/万元   | 地质预报措施   | 工期/d | 投资/万元 |            |             |
| 冰沟                | 超前钻探   | 15    | 11.3    | 综合超前地质预报 | 5    | 3.8   | 10         | 7.5         |
| 上河沿               | 超前钻探   | 30    | 22.7    | 综合超前地质预报 | 12   | 9.1   | 18         | 13.6        |
| 马场梁               | 超前钻探   | 66    | 49.8    | 综合超前地质预报 | 29   | 22.0  | 37         | 27.8        |
| 蛟龙山               | 超前钻探   | 45    | 30.2    | 综合超前地质预报 | 21   | 15.9  | 24         | 14.3        |
| 油山                | 超前钻探   | 51    | 38.5    | 综合超前地质预报 | 13   | 9.8   | 38         | 28.7        |
| 老虎坳               | 超前钻探   | 64    | 48.3    | 综合超前地质预报 | 28   | 21.2  | 36         | 27.1        |
| 荔竹坝               | 超前钻探   | 61    | 46.1    | 综合超前地质预报 | 32   | 24.2  | 29         | 21.9        |
| 江屋                | 超前钻探   | 52    | 39.3    | 综合超前地质预报 | 30   | 22.7  | 22         | 16.6        |
| 大枧水               | 超前钻探   | 23    | 17.4    | 综合超前地质预报 | 9    | 6.8   | 14         | 10.6        |
| 河口林场              | 超前钻探   | 63    | 47.6    | 综合超前地质预报 | 33   | 25.0  | 30         | 22.6        |
| 司前 2 <sup>#</sup> | 超前钻探   | 19    | 14.5    | 综合超前地质预报 | 7    | 5.3   | 8          | 9.2         |
| 司前 3 <sup>#</sup> | 超前钻探   | 29    | 22      | 综合超前地质预报 | 11   | 8.3   | 18         | 13.7        |
| 社背 1 <sup>#</sup> | 超前钻探   | 28    | 21.2    | 综合超前地质预报 | 10   | 7.6   | 18         | 13.6        |
| 社背 2 <sup>#</sup> | 超前钻探   | 60    | 45.3    | 综合超前地质预报 | 20   | 15.1  | 40         | 30.2        |
| 杨布塘               | 超前钻探   | 55    | 41.5    | 综合超前地质预报 | 13   | 9.8   | 42         | 31.7        |
| 大琴嘴               | 超前钻探   | 36    | 27.2    | 综合超前地质预报 | 12   | 9.1   | 24         | 18.1        |
| 亚桂山               | 超前钻探   | 86    | 65.0    | 综合超前地质预报 | 43   | 32.5  | 43         | 32.5        |
| 司前 1 <sup>#</sup> | 超前钻探   | 94    | 71.0    | 综合超前地质预报 | 56   | 42.3  | 38         | 28.7        |
| 屏风岭               | 超前钻探   | 56    | 42.3    | 综合超前地质预报 | 35   | 26.5  | 21         | 15.8        |
| 花果山               | 超前钻探   | 48    | 36.3    | 综合超前地质预报 | 25   | 18.9  | 23         | 17.4        |
| 排帮山               | 超前钻探   | 52    | 39.3    | 综合超前地质预报 | 24   | 18.2  | 28         | 21.1        |
| 东江                | 超前钻探   | 91    | 68.7    | 综合超前地质预报 | 53   | 40.0  | 38         | 28.7        |
| 走马岗               | 超前钻探   | 134   | 101.2   | 综合超前地质预报 | 50   | 37.8  | 84         | 63.4        |
| 鲤鱼地               | 超前钻探   | 65    | 49.1    | 综合超前地质预报 | 31   | 23.4  | 34         | 25.7        |
| 飞云顶               | 超前钻探   | 53    | 40.0    | 综合超前地质预报 | 27   | 20.4  | 26         | 19.6        |
| 笔架山               | 超前钻探   | 72    | 54.4    | 综合超前地质预报 | 43   | 32.5  | 29         | 21.9        |
| 企山排               | 超前钻探   | 76    | 57.4    | 综合超前地质预报 | 35   | 26.5  | 41         | 30.9        |
| 梅坳                | 超前钻探   | 88    | 66.5    | 综合超前地质预报 | 50   | 37.8  | 33         | 28.7        |
| 大铲岛               | 超前钻探   | 25    | 18.9    | 综合超前地质预报 | 14   | 10.6  | 11         | 8.3         |
| 合计                |        | 1 637 | 1 233.0 |          | 771  | 583.1 | 866        | 649.9       |

施工图设计,辅以综合超前地质预报系统进行设计施工,实践证明这种设计模式是可行的、可操作的,可供其他类似工程参考。

参 考 文 献

[1] 王进春,乔蓓.隧道施工危险性分析及安全对策措施初探[J].石油与天然气化工,2008,37(2):174-176.  
[2] 琚建明.超前地质预报技术在海底隧道施工中的应用[J].铁道工程学报,2007(7):76-80.  
[3] 李朝仪,唐学钊,叶文建.水平定向钻进技术在砂卵石层中的成功应用[J].天然气工业,2009,29(12):87-89.  
[4] 刘盛兵,向启贵,刘坤.水平定向钻穿越施工及其风险控制措施探讨[J].石油与天然气化工,2008,37(4):353-356.  
[5] 刘志刚,赵勇.隧道隧洞施工地质技术[M].北京:中国铁道出版社,2001.

[6] 持田丰.青函隧道的破碎带的稳定处理[J].隧道译丛,1978(6):14-25.  
[7] 冰沟隧道、上河沿隧道现场施工记录[R].银川:西气东输二线宁陕段施工例会,2008.  
[8] 司前 1<sup>#</sup>隧道、亚桂山隧道现场施工记录[R].从化:西气东输二线粤桂段施工例会,2009.  
[9] 西气东输二线管道工程初步设计[R].北京:西气东输二线初步设计审查会,2008.  
[10] 西气东输二线管道工程西段干线施工图设计[R].乌鲁木齐:西气东输二线西段施工图审查会,2008.  
[11] 西气东输二线管道工程东段干线施工图设计[R].廊坊:西气东输二线施工图设计审查会,2009.  
[12] 西气东输二线管道工程广州—深圳支线施工图设计[R].廊坊:西气东输二线施工图设计审查会,2009.