

西气东输中卫黄河穿越隧道水文地质分析

卿春和, 康 胜, 赵 普, 徐 玮, 李静林

(中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司, 四川 成都 610017)

摘 要:西气东输中卫黄河穿越隧道长度约 1 200 m, 净跨度 5.3 m, 净高 4.5 m。隧道洞身位于黄河河床之下最大深度约 100 m。隧址区地层经受构造变动时间长, 强度大, 断层较多, 主要断裂为香山—天景山断裂带。受断裂影响, 主要发育一些短轴背斜和向斜。隧道洞身位于断层影响带内, 其中次级断裂和层间错动很发育。隧道围岩为寒武系香山群磨盘井组细粒长石石英砂岩夹千枚状板岩、绢云母化千枚岩, 岩层陡倾或直立, 岩体较破碎。地下水类型为基岩裂隙潜水, 水位埋藏较浅, 受大气降水和黄河河水渗入补给。隧道勘察过程中, 加强了水文地质分析; 根据水文地质分析成果, 对隧道位置选择和隧道埋深确定提供了恰当的依据。实践证明, 合理的水文地质分析对隧道工程方案制订、结构设计、施工方法选择、施工安全、顺利贯通和正常营运等都具有现实意义。

关键词:西气东输; 水下隧道; 水文地质分析; 渗透系数; 隧道埋深

文章编号: 1006-5539(2010)05-0058-06 **文献标识码:** A

0 前言

西气东输及其复线工程是实施西部大开发战略, 保持我国国民经济持续、快速、健康发展的举世瞩目的重大工程。为了保证西气东输管道中卫黄河跨越管段的安全运行, 需要考虑设置备用过河管道, 结合西气东输复线建设等过黄工程的需要, 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司提出建设中卫黄河隧道穿越工程项目。

本工程是西气东输中卫黄河跨越备用线 (Φ 1 016 mm)、西气东输规划建设复线过黄河管道 (Φ 1 420 mm) 以及预留过河管道 (Φ 1 016 mm) 等三条管道共同通过黄河的合建穿越工程。

黄河隧道属于水下长隧道, 位于西气东输管道工程中卫黄河跨越上游约 1.2 km 处; 距拟建的大柳树水利枢纽工程泄洪隧道约 1.4 km, 下游沙坡头自然保护区和三北防护林带南缘约 2 km^[1]。

1 区域地质构造与地形地貌

中卫黄河穿越隧道隧址区, 在大地构造位置上隶属昆仑—秦岭地槽褶皱区祁连地槽褶皱系走廊过渡带之东北端。隧址区主要断裂为香山—天景山断裂带, 亦称之为中卫—同心断裂带。该断裂带向西散开, 向东收敛, 呈弧形状逐渐并拢, 并与清水河断裂相交归并, 形成一条区域性的弧形构造带。该断裂总体呈向北东突出的弧形展布, 全长约 200 km。断裂带由数条次级断层组成, 多呈左阶羽列。

对中卫黄河穿越隧道工程影响较大的断层主要有长流水断层 (F_{201}) 和窑沟断层 (F_7), 见图 1。

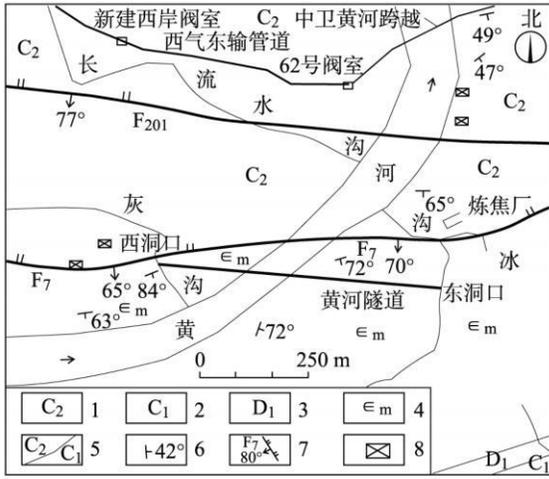
1.1 长流水断层 (F_{201})

亦称其为 F_5 断层, 总体产状 280° (走向) / SW (倾向) $\angle 60^\circ \sim 80^\circ$ (倾角) 左右, 断层带宽度 3 ~ 5 m, 长度约 8 km, 断层性质属于逆断层。管道线路穿越其西段。断层在黄河以西地貌上表现为一条醒目

收稿日期: 2010-03-31

基金项目: 中国石油天然气集团公司重点项目资助 (K2004-90E)

作者简介: 卿春和 (1965-), 男, 四川简阳人, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩土工程勘察、设计与施工工作。



1. 石炭系上统; 2 石炭系下统; 3 泥盆系上统老君山组; 4 寒武系香山群磨盘井组; 5. 地层分界线; 6 岩层面产状; 7. 逆断层及其编号、断层面倾角; 8 废弃小煤窑

图 1 隧址区地质构造示意图

的陡坎, 坡度 $15^{\circ} \sim 17^{\circ}$, 横切夜明山北麓洪积扇和黄河阶地。总体上, 南盘为石炭系煤系地层, 上覆第四系全新统冲洪积砂砾石层, 北盘为晚更新世黄土和砂砾石层, 前者向北逆冲于后者之上, 同时具有明显的左旋走滑性质, 穿越断层陡坎的一系列冲沟发生不同程度的左旋位移, 位移量为几米至二三十米。黄河以东, 断层从石炭系煤系地层中通过, 距离南侧 F_7 断层较近, 卫星照片显示线性影像特征^[2-4], 见图 2。

1.2 窑沟断层 (F_7)

F_7 断层又称冰沟断层。该断层走向近东西, 倾

向南, 倾角变化较大; 大体以上河沿为界, 西段走向近东西, 东段为北西西向。西起麻雀湾南, 向东经夜明山北麓, 渡黄河, 过冰沟, 沿烟筒山北麓延伸, 在粉石沟附近被北北西向断层所截断, 全长约 23 km。断层南盘以石炭系为主, 北盘主要为第三系。在窑沟见到发育在石炭系与第三系之间的南倾高角度断层错开了上更新统冲、洪积砾石层。该断层在隧址区, 总体走向为 $90^{\circ} \sim 95^{\circ} / S \angle 52^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。断层性质属于逆断层。上盘 (南盘) 为寒武系灰绿色砂岩、千枚状板岩和千枚岩, 下盘 (北盘) 为石炭系灰黑色砂岩、炭质页岩和煤层。断层面一般较陡, 呈“S”型变化。断面倾角变化较大, 表现为南盘向北盘逆冲或逆掩于石炭系之上。多处见到清楚的断层露头, 平面上呈舒缓波状。断裂压性特征明显, 破碎带内挤压透镜体十分发育。断层破碎带宽度 5~10 m, 由断层泥和糜棱岩组成, 局部夹有泥盆系红色砂岩捕虏体 (断片岩)。沿断层走向错断山脊, 形成断层崖和陡壁。在冰沟口, 断层带中夹有泥盆系紫红色砂岩, 向东、西两侧尖灭, 表明断层是在近南北向的构造应力场的作用下形成的。受断层复合影响, 在黄河左岸灰沟形成小型构造盆地。由于该断层位于中卫黄河穿越隧道场地北侧 35~204 m 其活动性对隧道施工环境和运营安全影响较大。据大柳树水利枢纽工程坝址勘察探槽揭露, 未见错断全新世地层。在黄河左岸 VIII 级阶地上, 探槽揭穿厚约 7 m 的黄河 VIII 级阶地卵石层, 底部露出寒武系、石炭系及其间的 F_7 断层破碎带。厚度 7m 的卵石层水平层理清楚, 未被 F_7 断层断错或扰动, 表明该断层在晚第四纪以

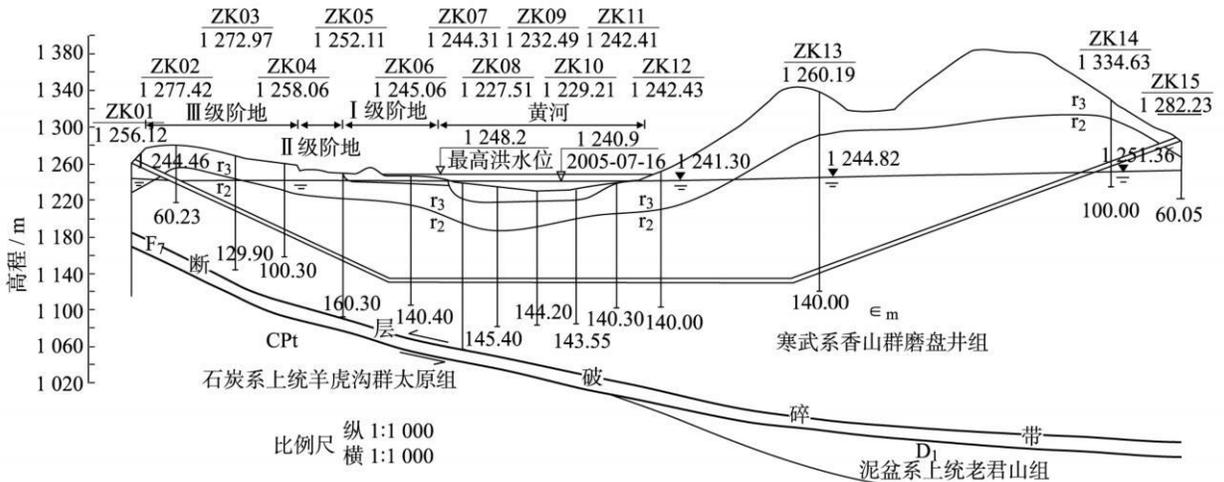


图 2 中卫黄河隧道穿越剖面简图

来已不活动^[5]。

隧址区受断裂影响,主要发育一些短轴背斜和向斜。在黄河右岸冰沟出露一褶皱,背斜轴部较窄,向斜轴部较宽。隧道穿越地段无较大规模褶皱,但由于岩层受构造变动,发育小规模褶皱和褶曲。

隧道洞身位于断层影响带内,其中次级断裂和层间错动很发育。层间错动的构造形迹主要表现为岩层中见小的褶皱和揉搓现象。岩层间错动距离较小,一般小于 5 m。由于强烈挤压作用和剪切作用,错动两侧岩层羽状裂隙发育,层间挤压带内岩体多呈糜棱状、角砾状,破碎程度变化大,呈松软和破碎状,破碎带的宽度一般为 0.3~0.5 m 最大者可达 4 m。在产生层间错动后,岩层中出现明显的断开现象,岩体强度大为降低。

隧址区构造活动强烈,在峡谷壶口地貌条件影响下,岩体中节理、裂隙很发育,且以风化裂隙为主,构造裂隙次之,多呈密闭状,部分微张开,并有少量充填物,围岩岩体往往被节理、裂隙切割呈碎块状。

隧址区在内营力地质作用和外营力地质作用的同时互相作用下,塑造出现状地貌景观:南部低山、中部丘陵、北部平原。黄河右岸紧邻香山北缘,地形起伏大,相对高差大于 200 m。黄河左岸受黄河和长流水沟流水侵蚀以及腾格里沙漠南缘的活动沙丘覆盖,地形相对平缓,呈现为丘陵地貌,相对高差小于 100 m。隧道穿越段微地貌为右岸紧邻低山北缘,地形起伏破碎,冲沟发育;左岸紧邻腾格里沙漠南缘,发育多级阶地,坡度相对较缓,阶地台面平缓。

2 隧道围岩地层岩性

受 F_3 断层影响,隧址区寒武系地层上覆于泥盆系和石炭系地层之上。在黄河隧道以北、黄河右岸冰沟沟口出露泥盆系老君山组红色砂岩捕虏体(断片岩);岩性由紫红色—灰紫色钙质含砾石英砂岩、粉砂岩、泥岩和砾岩组成。在黄河隧道以北出露石炭系上统羊虎沟群太原组砂岩和页岩互层;岩性以灰白、褐灰色中—厚层、中—薄层中—细粒长石石英砂岩,深灰—黑灰色粉砂质页岩、黑色页岩、粉砂质泥岩、炭质泥岩、粉砂岩为主,夹深灰—灰色中—厚层含生物碎屑微晶灰岩、薄层煤和煤线^[6]。

黄河隧道主要在寒武系香山群磨盘井组岩层中

穿越。磨盘井组岩性主要为一套灰绿色中厚层状浅海相碎屑岩沉积的细粒长石石英砂岩夹千枚状板岩、绢云母化千枚岩。砂岩成层厚度较大,单层厚度一般 5~10 m 最大厚度可达 20 m 左右。千枚状板岩和绢云母化千枚岩,成层厚度较薄,单层厚度一般 0.5~1.5 m 最大厚度 5 m 左右。砂岩与千枚状板岩、绢云母化千枚岩二者在隧道断面上所占比例平均各约为一半,部分地段所占比例变化范围值较大。泥质岩石成份由下向上逐渐增加。岩层普遍倾向 SE 倾角 $55^\circ \sim 83^\circ$ 。地层经区域动力变质,成岩较好,坚硬。砂岩呈块状风化,钻孔取样多为短轴状和块状;板岩和千枚岩呈片状及碎屑状风化,钻孔无法取出完整岩芯;强风化层厚度约 25~45 m。

隧道围岩受区域构造作用影响,沿千枚岩或板岩层面发生层间滑动较为普遍。层间滑动断距大小不等,差别较大。滑动面扭曲变形严重。滑动破碎带宽度一般 0.3~0.5 m 最大可达 4 m 左右,并由断层泥和糜棱岩组成。层间滑动以逆冲挤压变形为主,水平和斜滑次之。

3 隧道场地水文地质条件

隧址区地下水补给、迳流、排泄受大气降水、黄河地表水体、地层岩性和地貌条件及水文网切割深度所控制。地下水的补给形式有两种:其一是来自大气降水渗入补给;其二是黄河地表水体渗入补给。

3.1 黄河隧道西段水文地质特征

黄河隧道西段(左岸陆域区)地下水为层状基岩裂隙潜水。含水层为寒武系香山群磨盘井组浅变质灰绿色长石石英细粒砂岩、千枚状板岩、绢云母化千枚岩。岩体破碎,节理、裂隙发育,层间断裂错动较多,地下水补给条件较差,含水层富水性也较差。地下水位高程一般为 1 244 m 左右,高出黄河河水面 4 m 左右。

3.2 黄河隧道中段水文地质特征

隧道中段通过的黄河水域地区,河床上部为厚度约 10~15 m 的第四系松散堆积物孔隙潜水含水层;河床下部为层状基岩裂隙潜水,含水层为寒武系香山群磨盘井组浅变质灰绿色长石石英细砂岩、千

枚状板岩、绢云母化千枚岩。黄河水地区地下水高程 1 240 m 左右, 并随黄河水位升降而变化。由于补给源充沛, 含水层富水性好。

3.3 黄河隧道东段水文地质特征

黄河隧道东段(右岸陆域)地下水为层状基岩裂隙潜水。含水层为寒武系香山群磨盘井组浅变质的灰绿色长石石英细粒砂岩、千枚状板岩、绢云母化千枚岩。岩体破碎, 节理、裂隙发育, 层间错动和小型断裂较多, 地下水补给条件较差, 含水层富水性也较差。地下水位 1 250 m 左右, 高出黄河水面 10 m 左右。

4 隧道水文地质试验成果分析

勘察期间在 ZK07 和 ZK12 钻孔进行了单柱塞法压水试验, 在 ZK05 和 ZK06 钻孔进行了钻孔分层抽水试验。

ZK07 钻孔压水试验成果显示, 隧道围岩透水率在垂直方向上有较大变化。地下埋深 80 ~ 100 m 段岩层透水率小于 10 Lu, 其余试段岩层透水率大于

10 Lu 上部岩层的透水率比下部岩层的透水率大很多, 见图 3。

ZK12 钻孔压水试验成果显示, 隧道围岩透水率在垂直方向上也有较大变化。地下埋深 30 ~ 35 m 段及以上段岩层透水率大于 50 Lu 地下埋深 35 ~ 75 m 段和 85 ~ 140 m 段岩层透水率为 5 ~ 30 Lu 地下埋深 75 ~ 85 m 段岩层透水率小于 5 Lu 见图 4。

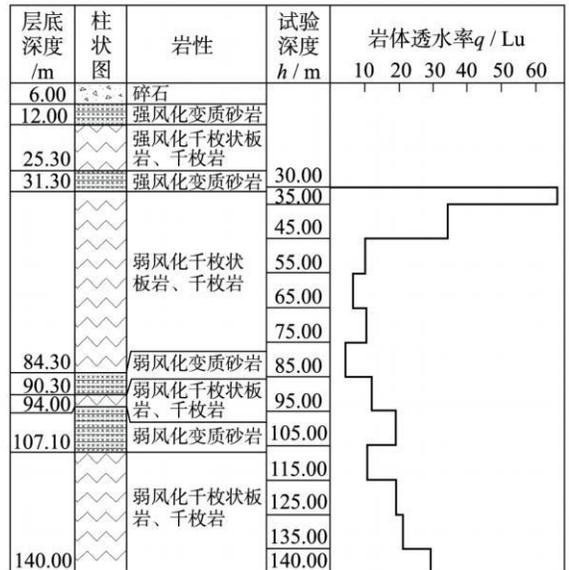


图 4 ZK12 钻孔压水试验 q-h 曲线图

表 1 中 ZK06 钻孔抽水试验显示, 降深越小, 单位涌水量和渗透系数越大, 反之亦然; 但流量变化却很小。图 5 ~ 6 显示, 含水层分布范围较小, 含水层渗透性和地下水补给条件差。因此, 地下埋深 76 m 以上段含水层属于弱透水; 地下埋深 76 m 以下段属于微透水。

表 1 ZK05 ZK06 钻孔空压机抽水试验成果

| 钻孔编号 | 抽水时孔深 /m | 降深 S/m | 流量 Q /L _s s ⁻¹ | 单位涌水量 q | | 渗透系数 K | | 透水性 |
|------|----------|--------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----|
| | | | | /L _s s ⁻¹ ·m | /m d ⁻¹ | /m d ⁻¹ | /m d ⁻¹ | |
| ZK05 | 109 | 42 91 | 0 46 | 0 011 | 0 009 | 微透水 | | |
| | | 34 40 | 0 45 | 0 013 | 0 011 | 弱透水 | | |
| | | 10 80 | 0 37 | 0 034 | 0 025 | 弱透水 | | |
| | 57 | 38 32 | 0 46 | 0 012 | 0 015 | 弱透水 | | |
| | | 27 19 | 0 43 | 0 016 | 0 020 | 弱透水 | | |
| | | 17 28 | 0 40 | 0 023 | 0 029 | 弱透水 | | |
| ZK06 | 137 | 53 32 | 0 37 | 0 007 | 0 005 | 微透水 | | |
| | | 40 28 | 0 34 | 0 008 | 0 007 | 微透水 | | |
| | | 23 44 | 0 30 | 0 013 | 0 014 | 弱透水 | | |
| | 76 | 46 13 | 0 35 | 0 008 | 0 007 | 微透水 | | |
| | | 32 50 | 0 33 | 0 010 | 0 011 | 弱透水 | | |
| | | 18 99 | 0 33 | 0 017 | 0 012 | 弱透水 | | |

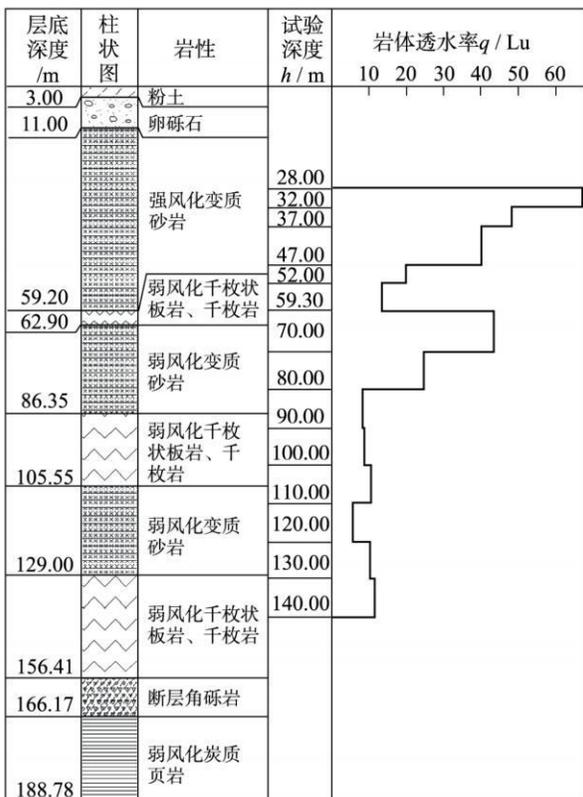
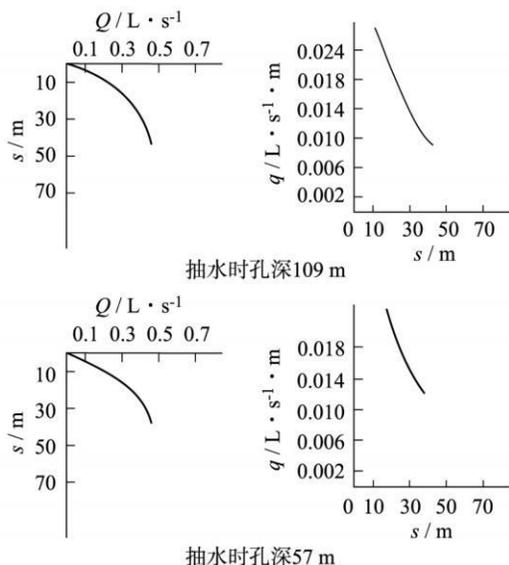
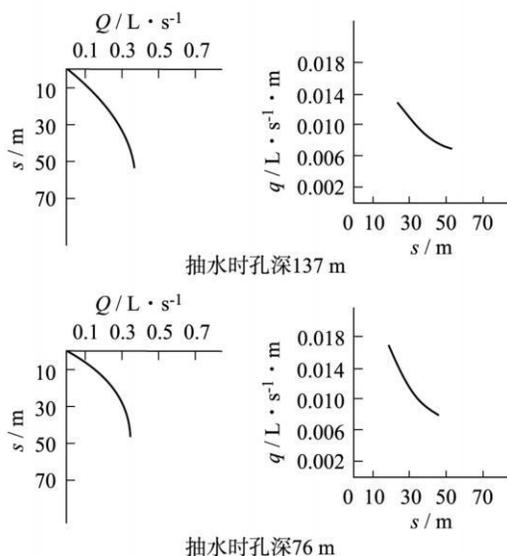


图 3 ZK07 钻孔压水试验 q-h 曲线图

图5 ZK05钻孔 $Q \sim s$ 、 $q \sim s$ 曲线图6 ZK06钻孔 $Q \sim s$ 、 $q \sim s$ 曲线

钻孔分段压水试验、分层抽水试验和波速测试成果显示:隧道地段基岩中 70 m 以上段,岩体节理、裂隙发育,岩层透水性较好;但是在基岩中 70 m 以下段,岩体节理、裂隙相对不发育,岩层透水性也相对较差;因此,为减弱岩体物理风化的影响,应适当加大隧道埋深。

5 隧道河床段埋深确定

隧址区断裂构造发育,受构造运动影响,岩体的节理、裂隙也很发育,水文地质工程地质物探和钻探

以及钻孔水文地质试验成果显示:隧道围岩埋深 35 ~ 45 m 段及以上段岩层破碎,属强风化带;地下埋深 35 ~ 45 m 以下至 140 m 段岩层较破碎,属弱风化带;地下埋深 75 ~ 100 m 段岩层较完整,属于弱风化带,是隧道穿越黄河的最佳深度。

6 隧道施工营运安全检验

经多种方案比较,推荐的拟建黄河隧道位于西气东输黄河跨越点南 1.2 km 处 F_3 逆断层上盘。隧道围岩为寒武系香山群磨盘井组浅变质灰绿色中厚层状长石石英细粒砂岩、板岩、千枚岩。岩石坚硬,相对完整,地下水补给条件较差,含水层富水性不佳。隧道进洞口、出洞口山体选择在寒武系新鲜的岩石出露部位,山坡较为平缓,无大规模地质灾害。交通条件较好,排水、排渣方便。隧道轴线与区域地质构造线平行,有利于隧道围岩稳定。隧道位置既避开了沙坡头自然保护区、石炭系软质岩石地段和全新活动断裂带,又不受上游拟建的大柳树水利枢纽工程蓄水和泄洪安全威胁,属最佳穿越位置。选择拟建黄河隧道平巷部分埋深于基岩面以下 75 m 岩层强风化界线下面 50 m (隧道平巷底板高程为 1 130 m) 是适宜的;既有利于隧道施工的防止水和围岩稳定,且距下伏 F_3 断层带有一定的距离 (大于 50 m), 其对隧道围岩的不利影响也大为减弱,有利于隧道的营运安全;也不会对拟建的大柳树水利枢纽工程的配套工程和兰州铁路局银川供电段中卫甘塘给水一所的取水 (黄河河床下部砂、砾、卵石层中) 造成影响。隧道施工过程中,加强了全断面超前探水、注浆堵水、超前支护 (超前管棚、超前注浆), 结合“新奥法”施工原则,加强隧道应力、因变的监控量测,及时进行初期支护 (钢格栅和挂钢筋网锚喷混凝土) 和钢筋混凝土二次衬砌,并时常进行瓦斯含量检测,预防下伏石炭系含煤地层中瓦斯穿层突出。

综上所述,拟建黄河隧道远离沙坡头旅游区、已建或拟建的沙坡头和大柳树水利枢纽工程坝址;在平面上避开了 F_3 断层;在立面上位于断层破碎带的上方,隧道洞身位于断层的上盘——寒武系香山群磨盘井组砂岩、板岩和千枚岩地层中;岩层倾角陡也有利于隧道开挖平巷硐室的稳定。本隧道已竣工近两年,施工过程中未出现大规模涌水和塌方事故,实践证明采用钻爆法隧道穿越黄河是可行的,隧道施

工和营运是安全的。

7 结语

水下隧道工程属于复杂的地下工程,地质露头点少,勘察成果以点代面,隧道施工过程中有可能出现某些异常。本文通过隧道岩土工程勘察过程中加强了水文地质观测和试验,深入开展水文地质分析,选择适宜的隧道埋深,确定客观的水文地质参数^[7-9],合理地指导了隧道设计和施工方案的制订,也为同类隧道的设计和施工方案制订提供了相应的水文地质理论依据。

参考文献:

- [1] 卿春和,李束为,李洪训,等.中卫黄河隧道穿越工程岩土工程勘察报告[R].成都:中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司,2005.
- [2] SY/T 0053—2004 油气田及管道岩土工程勘察规范[S].
- [3] JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S].
- [4] GB 50423—2007 油气输送管道穿越工程设计规范[S].
- [5] 韩文峰,杜东菊,谏文武,等.黄河黑山峡大柳树松动岩体工程地质研究[M].兰州:甘肃省科技出版社,1993.
- [6] 李宝贵.长流水幅 1/5 万地质图及说明书[M].银川:宁夏回族自治区地质矿产局勘察院,1997.
- [7] 崔玖江.隧道与地下工程修建技术[M].北京:科技出版社,2005:76-82.
- [8] 关宝树.隧道工程施工要点集[M].北京:人民交通出版社,2003:95-102.
- [9] 卿春和,巫春霖,康胜,等.南干线西段泸州长江隧道工程地质分析[J].天然气与石油,2009,27(1):55-58.