

引用格式: 白金朋, 董延安, 甘俊, 等, 2023. 太原抽水蓄能电站关键部位地应力状态及其在枢纽工程布设中的应用 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 375–387. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232907

Citation: BAI J P, DONG Y A, GAN J, et al., 2023. In-situ stress state in critical areas of the Taiyuan pumped storage power station and its application in pivot project layout[J]. Journal of Geomechanics, 29 (3): 375–387. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232907

太原抽水蓄能电站关键部位地应力状态及其在枢纽工程布设中的应用

白金朋¹, 董延安¹, 甘俊¹, 赵晓阳¹, 李红利¹, 柴宝²
BAI Jinpeng¹, DONG Yan'an¹, GAN Jun¹, ZHAO Xiaoyang¹, LI Hongli¹, CHAI Bao²

1. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024;
2. 山西省水利水电勘测设计研究院有限公司, 山西太原 030024
1. *Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China;*
2. *Shanxi Water Conservancy and Hydropower Survey, Design and Research Institute Co., Ltd, Taiyuan 030024, Shanxi, China*

In-situ stress state in critical areas of the Taiyuan pumped storage power station and its application in pivot project layout

Abstract: The hydraulic fracturing in-situ stress testing technology was used to test two boreholes (500-meter and 520-meter deep) at the Taiyuan pumped storage power station in Shanxi Province. The in-situ stress state of critical areas was obtained, and the ground stress level, underground building layout, and lining form in the project area were analyzed. The results show that the maximum horizontal principal stress ranges from 10.98 to 18.09 MPa, the minimum horizontal principal stress from 6.79 to 11.32 MPa, and the vertical principal stress from 9.61 to 13.57 MPa. Compared with the high and low in-situ stress values at the north and south ends of Shanxi Province, respectively, the measured values are between; Compared with the simulated in-situ stress field in the Qinshui Basin, the test results are basically consistent. The vertical stress values are between the maximum horizontal principal stress values and the minimum horizontal principal stress values ($S_H > S_V > S_h$), which means the maximum horizontal stress at the measuring point is the maximum principal stress and is in the strike-slip stress state. Its lateral pressure coefficient K_{av} is between 0.92 and 1.09, reflecting that the tectonic action in the engineering area is not intense. In the range of 330–506 meters, the saturated uniaxial compressive strength of the two boreholes is between 35 and 107 MPa, with an average of 63.79 MPa, and the ratio of the saturated strength to the maximum principal stress (R_b/σ_m) is between 3.54 and 5.81, belonging to the medium–high stress level. The direction of the maximum horizontal principal stress in the project area is NE 43° to NE 70.5°, and the average is NE 59.5°, consistent with the regional focal mechanism solution and GPS displacement data. From the perspective of in-situ stress orientation, the average direction of the maximum principal stress in the engineering area is NE 59.5°, and the direction of the long axis of the underground powerhouse is between NE 29.5° and NE 89.5°, which is conducive to the stability of the surrounding rock of the powerhouse. The maximum water head P_H of the underground hub project is about 4.62 MPa (i.e., $P_H < \sigma_3$). Based on the hydraulic splitting criterion, it can be seen that the rock mass can resist the maximum internal water pressure, and the reinforced concrete lining of the water transmission tunnel can satisfy the stability of the water transmission tunnel. The research results can be widely used in investigating and designing pumped storage power station projects.

Keywords: hydraulic fracturing; in-situ stress; principal stress direction; axis of underground powerhouse; diversion tunnel lining

第一作者: 白金朋 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地应力测量、水电工程稳定性评价等研究工作。

E-mail: baijp@bjj.powerchina.cn

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-05-19; 责任编辑: 王婧

摘要: 采用水压致裂地应力测试技术, 开展了山西太原抽水蓄能电站工程 2 个孔 (孔深 500 m 和 520 m) 的地应力测试工作, 获得了工程区关键部位地应力状态, 分析了工程区的地应力水平、地下建筑布设方式和衬砌形式。结果表明: 工程区最大水平主应力为 10.98~18.09 MPa, 最小水平主应力为 6.79~11.32 MPa, 垂直主应力 9.61~13.57 MPa; 与山西省南北两端“南高北低”地应力值相比, 此次测值处于两者之间, 与沁水盆地地应力场模拟值相比, 测试结果基本一致; 垂直应力介于最大水平主应力和最小水平主应力之间 ($S_H > S_V > S_h$), 即测点的最大水平应力即最大主应力, 且处于走滑型应力状态, 其侧压系数 K_{av} 为 0.92~1.09, 反映出工程区构造作用不强烈; 2 个钻孔 330~506 m 范围内岩石饱和单轴抗压强度 (R_b) 为 35.00~107.00 MPa, 平均为 63.79 MPa, 岩石饱和单轴抗压强度与最大主应力比值 (R_b/σ_m) 为 3.54~5.81, 属于中—高应力水平; 工程区最大水平主应力方向为 NE 43°—NE 70.5°, 平均为 NE 59.5°, 与区域震源机制解、GPS 位移资料研究结果一致; 从地应力方位考虑, 地下厂房长轴线方向位于 NE 29.5°—NE 89.5°之间, 有利于厂房的围岩稳定; 地下枢纽工程最大水头 P_H 约为 4.62 MPa, 小于最小主应力值 σ_3 (6.79~11.32 MPa), 基于水力劈裂准则可知, 岩体本身具有足够抵抗最大内水压力能力, 输水隧洞采用钢筋混凝土衬砌, 能够满足输水隧洞的稳定性。该研究成果可在抽水蓄能电站工程勘察、设计中推广使用。

关键词: 水压致裂法; 地应力; 主应力方向; 地下厂房轴线; 输水隧洞衬砌

中图分类号: P315.72+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0375-13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232907

0 引言

国家“十四五”发展规划提出了“双碳”目标, 中国抽水蓄能电站规划建设需求得到快速增长。截至 2021 年底, 已建成抽水蓄能电站装机容量 3640 万千瓦, 2030 年将达到 12000 万千瓦 (韩冬等, 2022), 故抽水蓄能电站是中国未来清洁能源重要的发展方向。太原抽水蓄能电站为山西省“十四五”期间重点实施项目, 该电站建成后, 可为太原地区供电调峰提供有力保障, 而现今地应力状态 (大小和方向) 是抽水蓄能电站关键枢纽工程布设的重要依据。

水压致裂地应力测试技术是获取现今地应力状态最有效的原位测试方法之一。该技术作为国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐的地应力测量方法 (Brown and Hoek, 1978; 蔡美峰等, 1995; Haimson and Cornet, 2003), 具有基础理论完善、测试过程简单、资料整理方便、测试数据直接判读计算等优点, 已在水电、铁路、矿山、地灾与地震研究等领域中广泛应用 (Cai et al., 2009; Peng et al., 2009; 康红普等, 2010; 白金朋等, 2013; 乔二伟等, 2019; 孟文等, 2021, 2022; 丰成君等, 2022; 李彬等, 2022; 张重远等, 2022; 张宁等, 2022)。然而, 现场地应力测试受孔内各种不利因素限制, 如孔壁原生裂隙、干孔等,

有可能会失败。针对干孔卸压问题, 国内众多学者开展了相关研究工作 (罗超文等, 2018; 李阿伟等, 2019; 孙东生等, 2019; 吴满路和孙林, 2019; 张小林等, 2021), 虽然取得了一定的成效, 但未从根本上解决问题。而抽水蓄能电站通常会利用现有水库和附近的高山地势, 获取地下厂房和输水隧洞等枢纽地下工程的地应力状态, 测试孔往往布设在半山坡上, 致使孔内水位较深, 封隔器回收较为困难, 对地应力测试工作非常不利, 故需要基于现有经验来研究干孔的卸压装置。

地应力状态是地下厂房轴线方位、输水隧洞衬砌形式等水电地下构筑物设计的重要地质依据。太原抽水蓄能电站地下工程主要有上下库出水口、输水隧洞和地下厂房。其上库进水口高程 1333 m, 下库出水口高程 875 m; 输水隧洞全长约 2600 m, 最大水头压力 4.62 MPa; 地下厂房设计尺寸 (长×宽×高): 177 m×27 m×58 m。故较长距离输水隧洞和超大地下厂房是该水电工程的核心建筑物, 而地应力是影响水电枢纽工程布设的重要因素。

文章拟采用水压致裂地应力测试技术, 创新干孔卸压装置, 获得工程区关键部位地应力状态及其随深度的变化规律, 指导地下厂房布置设计和输水隧洞衬砌形式选择。该技术和研究成果可在抽水蓄能电站工程勘察、规划设计过程中推广使用。

1 区域地质背景

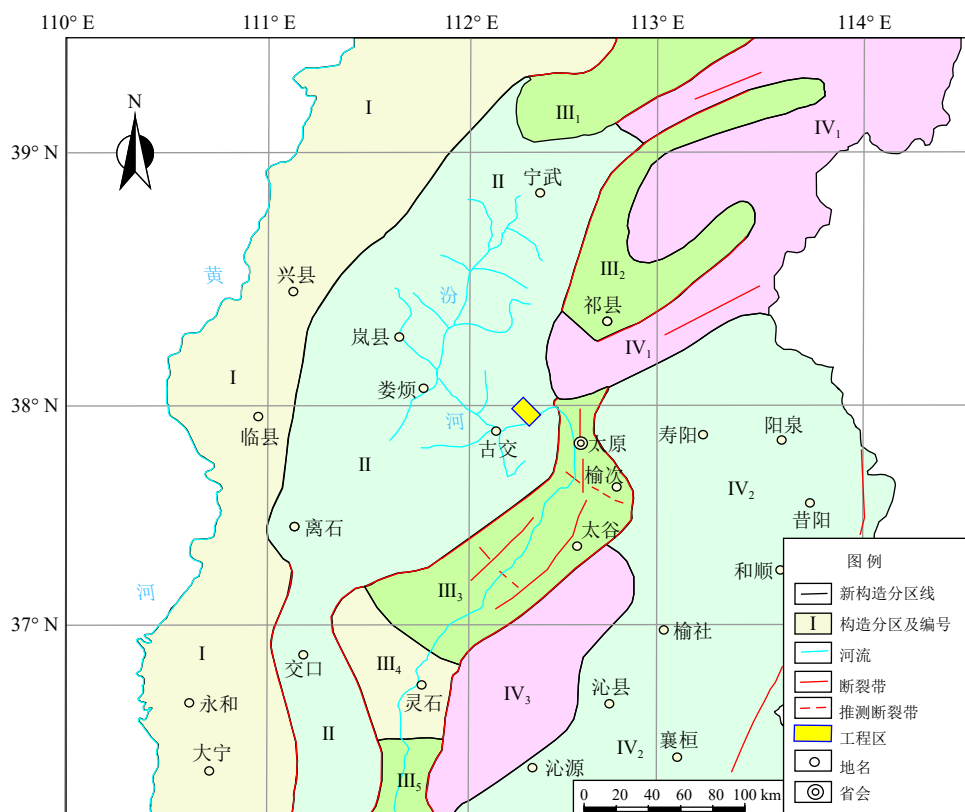
1.1 大地构造

工程区地质构造单元属于吕梁山断块隆起区(II), 形成于晋中新裂陷-太原断陷盆地(III₃)、恒山-五台山隆起区(IV₁)和吕梁山隆起区(II)的交汇部位(图 1), 位于古交掀斜地块内(柴宝等, 2022)。工程区内无区域性断裂构造。

1.2 地层岩性

工程区及其周缘地层出露有下古生界寒武系中统(C₂)结晶灰岩、鲕状灰岩, 寒武系上统(C₃)页岩、灰岩、竹叶状灰岩、泥质条带灰岩、白云岩等, 大面积分布于汾河两岸、西北部及晋祠。奥陶系下统(O₁)中厚层状白云岩夹泥质白云岩与页岩、竹叶

状白云岩和深灰色白云岩、页岩互层夹燧石条带和结核, 分布于下槐村至兰村沟口两侧及大留至西关口一带; 中统(O₂)灰黄色泥灰岩及角砾状泥灰岩, 深灰色中厚层状灰岩, 深灰色灰岩与灰黄色泥灰岩互层。第四系中更新统(Q₂)浅红色亚黏土, 含有钙质结核, 底部为砂砾石层, 上更新统(Q₃)以浅黄色亚砂土为主, 底部为砂砾石层(图 2a)。A-D 剖面显示, 抽水蓄能电站枢纽工程的重要水电设施为输水隧洞与地下厂房(图 2b)。输水隧洞穿越的地层主要岩性为第四系中更新统、上更新统的砂土、砂砾石层、奥陶系灰岩及泥灰岩。其中, 灰岩、泥灰岩段围岩类别以 III 类为主, 局部岩溶及节理裂隙较发育段为 IV 类, 泥灰岩、岩溶发育及节理裂隙密集段围岩类别为 V 类; 地下厂房埋深约 350 m, 围岩为奥陶系中统上马家沟组灰岩、白云质灰岩及泥灰岩,

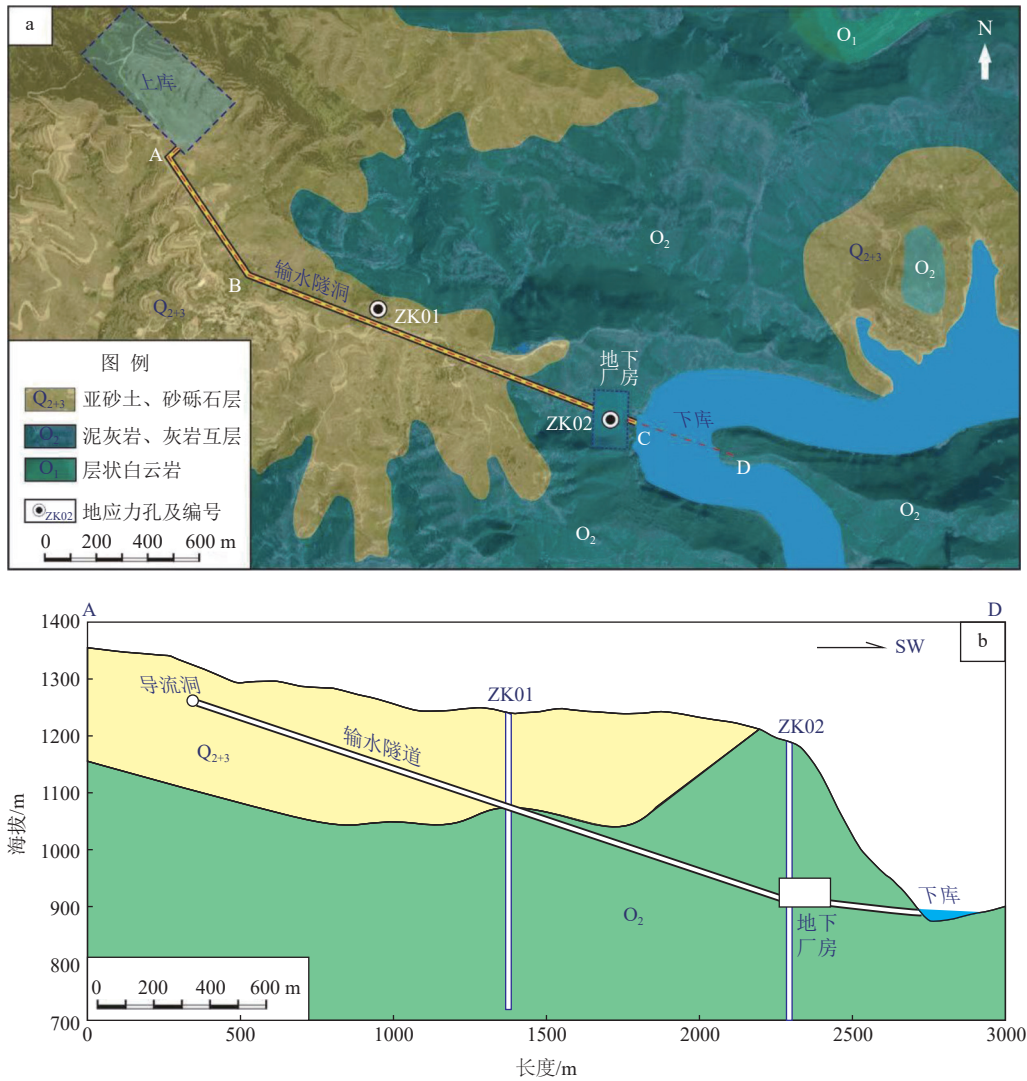


I—鄂尔多斯断块隆起区; II—吕梁山断块隆起区, III—汾渭断陷带; III₁—大同断陷盆地; III₂—忻定断陷盆地; III₃—晋中新裂陷-太原断陷盆地; III₄—韩侯岭横向隆起; IV—太行山断块隆起区; IV₁—恒山、五台山隆起区; IV₂—晋东南太行山隆起区; IV₃—太岳山隆起区; III₅—临汾断陷盆地

图 1 工程区及其周缘区域地质构造特征

Fig. 1 Geological and tectonic characteristics of the project area and its surrounding area

I—Erdos block upwarping; II—Lyuliangshan block upwarping, III—Fenwei fault depression basin; III₁—Datong fault basin; III₂—Xining fault basin; III₃—New Rift zone—Taiyuan fault basin in central Shanxi; III₄—Hanhouling transverse uplift; IV—Taihangshan fault block upwarping; IV₁—Hengshan—Wutaishan uplift zone; IV₂—Taihangshan uplift zone in southeastern Shanxi; IV₃—Taiyueshan uplift area; III₅—Linfen fault basin



a—抽水蓄能电站工程区地层岩性示意图；b—抽水蓄能电站工程枢纽设施布设示意图

图2 抽水蓄能电站工程区地层岩性及枢纽设施布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of formation lithology and layout of hub facilities in the engineering area of pumped storage power station

(a) Schematic diagram of stratum lithology in the project area of the pumped storage power station; (b) Schematic diagram of the pivot facility layout of the pumped storage power station

呈微风化至新鲜状态,岩体质量较好,类别以Ⅲ类为主。

2 计算公式与卸压技术

2.1 测试技术理论基础

由于该测试技术比较成熟,关于测试理论推导,在此不再赘述。文章采用水压致裂法进行地应力测试,得到关泵压力 P_s 、重张压力 P_r ;利用测试孔的水位换算出孔隙水压力 P_0 ,再利用式(1)和式(2)计算出最大水平主应力值 S_H 和最小水平主应力值 S_h ;利用式(3)计算测段的上覆岩体重量,进而获得垂直主应力值 S_v (蔡美峰等, 1995; 景锋等, 2008)。

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0 \tag{1}$$

$$S_h = P_s \tag{2}$$

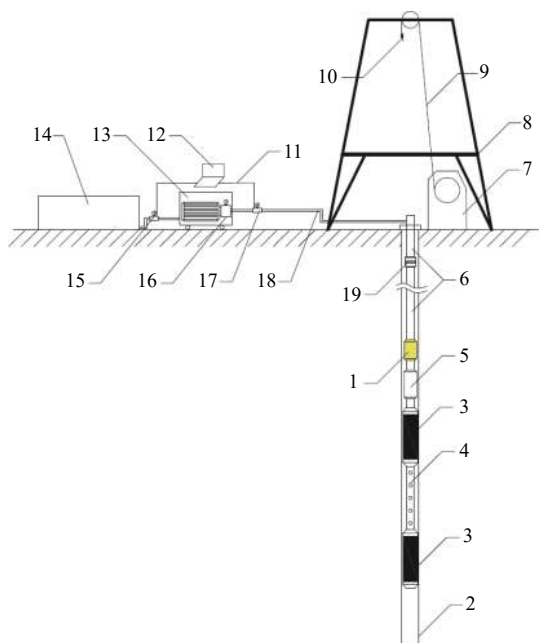
$$S_v = \rho g d \tag{3}$$

式中： P_s —关泵压力，MPa； P_r —重张压力，MPa； P_0 —孔隙水压力，MPa； ρ —上覆岩层密度， kg/m^3 ； g —重力加速度，取值 9.8 m/s^2 ； d —测段位置的深度，m； S_H —最大水平主应力，MPa； S_h —最小水平主应力值，MPa； S_v —垂直主应力，MPa。

2.2 钻孔低水位卸压技术

通常压裂测段完成后,卸压装置处于保压过水状态。但在低水位测试孔中,受钻杆(高压管道)

内、外的水位差影响,封隔栓塞仍然处于膨胀状态,与钻孔壁紧密接触,摩擦力非常大,若不采取措施直接提升,可能使孔口钻机、提升器和提升钻杆受力过限,面临巨大的威胁。由于该工程上下库水头压差大(海拔差约460 m)、枢纽工程(输水隧洞、地下厂房等)埋深大、勘探钻孔水位低(水位360~420 m)等特点,可能会引起水压致裂地应力测试井下装备不易回收的现象。结合工程特点,文章研发了适用于水压致裂地应力测试系统(图3)的新型干孔卸压装置(图4)。

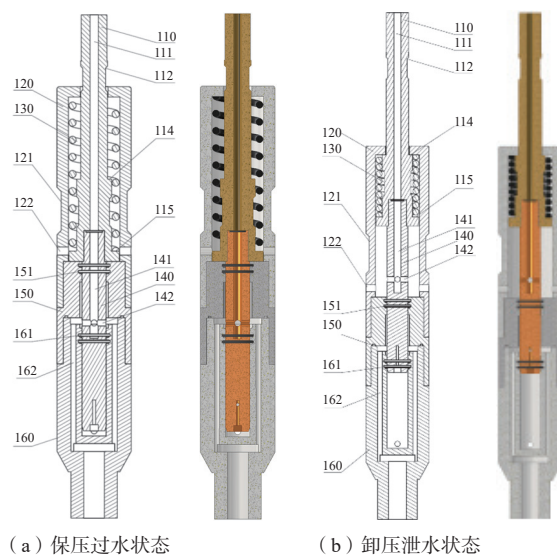


1—封隔栓塞组件卸压装置; 2—无水钻孔; 3—封隔栓塞组件; 4—压裂测试段; 5—推拉开关; 6—钻杆; 7—钻机; 8—钻塔; 9—钢丝绳; 10—提升器; 11—数据线; 12—笔记本电脑; 13—高压泵; 14—水箱; 15—电子流量计; 16—高压泵泵头、压力表; 17—数字压力计; 18—高压管路; 19—钻杆接头

图3 单回路水压致裂地应力测试系统示意图
Fig. 3 Schematic diagram of single-loop hydraulic fracturing in-situ stress test system

1—pressure relief device for packers; 2—waterless borehole; 3—packers; 4—fracturing test section; 5—push-pull switch; 6—drill pipe; 7—drill rig; 8—drill tower; 9—steel wire rope; 10—hoist; 11—data line; 12—laptop; 13—pump; 14—water tank; 15—flowmeter; 16—pump head/pressure gauge; 17—digital pressure gauge; 18—pipeline; 19—drill pipe connector

该卸压装置主要工作原理: 测段压裂完成后, 将过水支撑端子底部环形台阶(115)与上限位套筒(120)相向运动, 压缩承重弹簧(130), 直至过水支



(a) 保压过水状态 (b) 卸压泄水状态
110—过水支撑端子; 111—轴向过水孔; 112—紧固卡台; 114—中部环形限位台阶; 115—底部环形支撑台阶; 120—上限位套筒; 121—扳手卡台; 122—无螺纹泄水孔; 130—承重弹簧; 140—镀铬芯轴; 141—轴向过水孔; 142—径向过水孔; 150—中间连接件; 151—“O”型密封圈; 160—下部过水连接件; 161—“O”型密封圈; 162—过水孔

图4 干孔水压致裂地应力测试卸压装置结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the pressure relief device structure for dry pore hydraulic fracturing stress test

110—water-through support terminal; 111—axial water-through hole; 112—fastening card; 114—middle ring limit step; 115—bottom ring support step; 120—upper limit sleeve; 121—wrench clip; 122—threadless drain hole; 130—load-bearing spring; 140—chrome mandrel; 141—axial water-through hole; 142—radial water-through hole; 150—middle connector; 151—“O”-type seal ring; 160—lower water-through connector; 161—“O”-type seal ring; 162—water-through hole

撑端子中部环形限位台阶(114)卡在上限位套筒(120)内侧端部, 无法继续相向移动, 这样过水支撑端子的过水孔(111)、镀铬芯轴(140)的径向过水孔(142)与上限位套筒的泄水孔(122)连通, 装置上方钻杆内的水从上限位套筒的泄水孔快速泄出, 待水泄完后下放设备, 再使卸压装置恢复至保压过水状态(图4)。

通过上述卸压装置, 可将钻杆内的水泄出, 减小钻杆内外水位压力差, 削弱水位差的影响, 以便封隔栓塞收缩至正常状态, 降低其与钻孔孔壁之间的摩擦力, 可解决由于测试孔水位低、钻杆内外压力差大导致的封隔栓塞收缩不彻底等技术难题。

3 水压致裂地应力测试

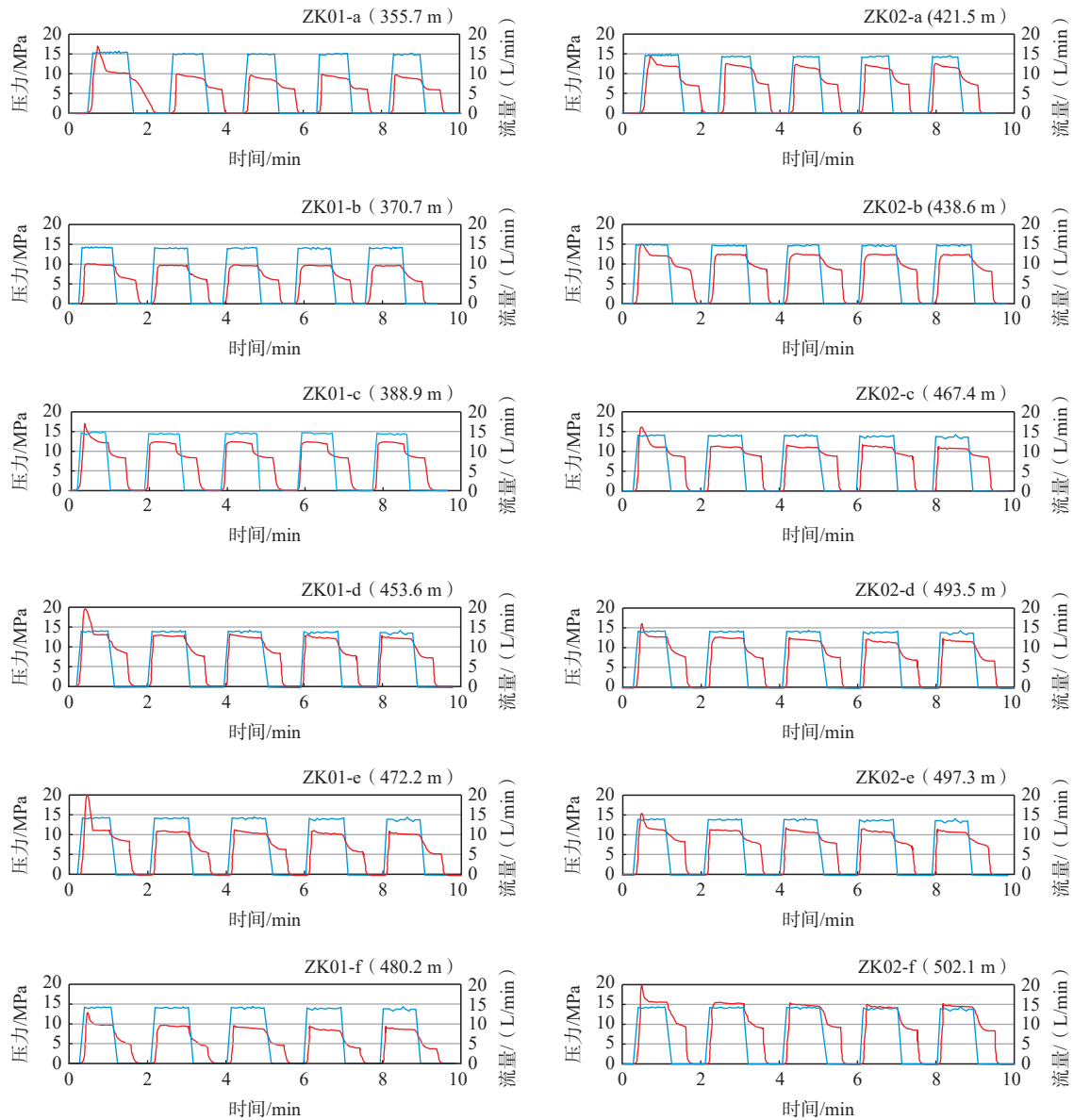
3.1 测试孔概况与测试段选择

太原抽水蓄能电站沿枢纽工程布设了 ZK01 和 ZK02 共 2 个地应力钻孔, 孔间距约 1.0 km。其中, ZK01 钻孔位于输水隧洞的中部, 孔深 500.0 m, 水位 420.0 m, 揭露主要岩性为亚砂土、砂砾石层、泥灰岩和灰岩; ZK02 钻孔位于地下厂房, 孔深 520.0 m, 水位 360.0 m, 揭露主要岩性为泥灰岩和灰岩, 为获得枢纽工程关键部位地应力状态奠定了工作基础

(图 2)。通过 ZK01 和 ZK02 钻孔的岩芯完整性分析, 分别在 355.7~480.2 m 和 421.5~502.1 m 深度范围内岩芯较为完整孔段各选出 6 段作为压裂测试段(赵晓阳等, 2022)。

3.2 地应力测试数据可靠性分析

文章采用单回路水压致裂地应力测试技术, 完成了太原抽水蓄能电站地下厂房和输水隧洞附近 2 个钻孔的原位地应力测试工作, 获得了典型的标准压裂曲线, 破裂压力(P_b)峰值明显, 重张压力(P_r)具有可重复性(图 5), 表明测得的数据可靠, 为研判地下厂房区(长度 170 m)和输水隧洞(长度约 2.6 km)



(a) ZK01 钻孔 6 测段

(b) ZK02 钻孔 6 测段

图例 — 破裂压力 — 瞬时流量

图 5 水压致裂压力及瞬时流量测试曲线

Fig. 5 Curves of hydraulic fracturing stress and instantaneous flow

的地应力状态及其随深度的分布规律提供了实测数据。

3.3 地应力测试结果

在 2 个孔测试深度 (355.7~502.1 m) 范围内, 基于原位地应力实测数据, 计算出 2 个测点的主应力值、主应力方向及相关侧压系数。其中, 最大水平

主应力值为 10.98~18.09 MPa, 最小水平主应力值为 6.79~11.32 MPa, 垂直主应力值介于最大和最小水平主应力值之间。另外, 通过印模定向装置, 获得工程区测点的最大水平主应力方向为 NE 43°—NE 70.5°, 平均为 NE 59.5°(表 1)。

表 1 地应力测试结果

Table 1 In-situ stress test results

孔号	测段位置/m	主应力值/MPa			最大水平与垂直主应力比值 K_{hv}	最小水平与垂直主应力比值 K_{hv}	最大与最小水平主应力比值 K_{hb}	侧压系数 K_{av}	最大水平主应力 S_H 方向
		最大水平主应力 S_H	最小水平主应力 S_h	垂直主应力 S_v					
ZK01	355.7	10.98	6.79	9.61	1.14	0.71	1.62	0.92	
	370.5	12.17	7.13	10.01	1.22	0.71	1.71	0.96	NE43°
	388.9	12.73	7.61	10.51	1.21	0.72	1.67	0.97	
	453.6	17.05	9.75	12.26	1.39	0.80	1.75	1.09	
	472.2	17.03	10.13	12.76	1.33	0.79	1.68	1.06	NE65°
	480.2	18.09	10.01	12.97	1.39	0.77	1.80	1.08	
	421.5	12.12	8.42	11.39	1.06	0.74	1.44	0.90	
ZK02	438.6	14.49	8.89	11.86	1.22	0.75	1.63	0.99	
	467.4	15.48	9.38	12.63	1.23	0.74	1.65	0.98	
	493.5	15.54	9.54	13.34	1.17	0.72	1.63	0.94	NE70.5°
	497.3	16.67	10.17	13.44	1.24	0.76	1.64	1.00	
	502.1	17.62	11.32	13.57	1.30	0.83	1.56	1.07	

4 地应力测试结果分析

4.1 主应力与深度关系

通过对最大、最小水平主应力进行线性拟合, 得到水平主应力回归方程为:

$$S_H = 0.043H - 4.309 \quad (4)$$

$$S_h = 0.026H - 2.433 \quad (5)$$

式中: H —钻孔深度, m。

实测主应力值随深度变化特征常常具有呈线性增加的趋势, 通过分析实测地应力值随深度的变化规律, 可推测区域构造应力场随深度的分布特征, 一般采用线性回归方程进行量化表征(包林海等, 2017)。基于太原抽水蓄能电站测点的主应力数据, 绘制出最大、最小水平主应力和垂直主应力随深度变化关系图(图 6), 可知最大水平主应力为测点最大主应力, 且主应力关系为 $S_H > S_v > S_h$, 表明测点为走滑应力状态。

4.2 测点的侧压系数

Hoek-Brown 用平均水平应力和垂直应力的比

值(即侧压系数)来表征岩体地应力状态一个物理量, 如式(6)所示。

$$K_{av} = (S_H + S_h) / 2S_v \quad (6)$$

基于工程区 2 个测点实测主应力数据, 计算出侧压系数 K_{av} 在 0.92~1.09 之间(表 1), 获得侧压系数(K_{av})随深度分布特征。由侧压系数 $K_{av} > 1$ 表示水平应力起主导作用、 $K_{av} < 1$ 表示垂直应力起主导作用可知, 工程区内水平构造应力作用并不强烈。通

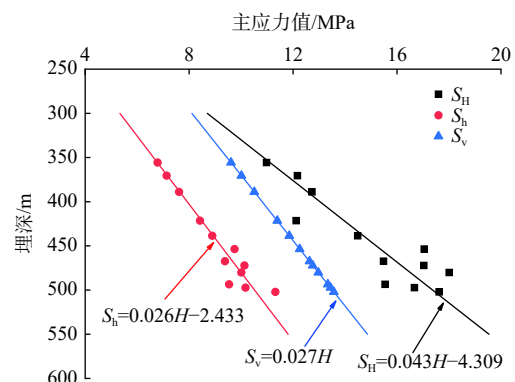


图 6 主应力随深度变化曲线

Fig. 6 Principal stress curves with depth

通过分析工程区的位置和最大主应力方向(北东向)发现,该工程区2个测点均位于下库的左岸,且距离库岸临空面(北东向)分别为100 m和1000 m,推测受临空面影响,测点的最小水平主应力(北西—南东向)积累能量有限,水平构造应力作用不强。

同时,将工程区获得的侧压系数绘制于杨树新等(2012)统计的华北地块 K_{av} 变化趋势线和变化范围包络线中,可以看出工程区内测得的 K_{av} 值全部在包络线范围内,并沿华北地块 K_{av} 的趋势线分布,具有良好的一致性(图7)。

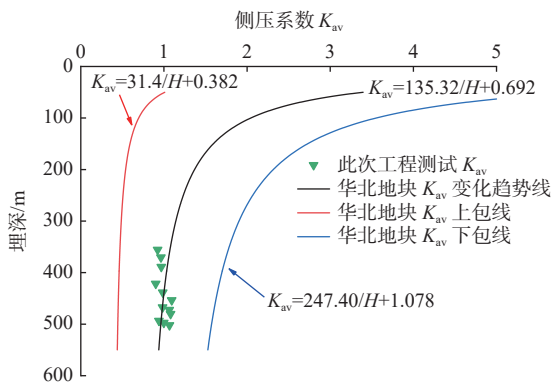


图7 侧压系数随深度变化曲线(据杨树新等, 2012 修改)

Fig. 7 Lateral pressure coefficient with depth (modified from Yang et al. 2012)

4.3 主应力量级分级

基于水力发电工程地质勘察规范(GB 50287-2016)最大主应力量级分级标准(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2016; 吕城腾, 2020),对岩石的最大主应力值(σ_m)和岩石饱和抗压强度应力比值法(R_b/σ_m)进行综合评判(表2)。依据后者既可进行岩爆等级分类,又可评价岩体最大主应力水平;用两个分级标准同时进行岩体应力水平判别时,若不在同一级别应力水平,从安全考虑,通常采用高等级应力分级指标作为判别结果。

表2 岩体应力分级表

Table 2 Initial stress classification of rock mass

应力分级	最大主应力值 σ_m /MPa	岩石强度应力比 R_b/σ_m
极高地应力	$\sigma_m \geq 40$	<2
高地应力	$20 \leq \sigma_m < 40$	2~4
中等地应力	$10 \leq \sigma_m < 20$	4~7
低地应力	$\sigma_m < 10$	>7

注: R_b 为岩石饱和单轴抗压强度, MPa; σ_m 为最大主应力, MPa

利用太原抽水蓄能电站工程区2个测试孔中330~506 m不同测段深度获取的8组岩心样品,开展室内岩石力学性质测试(柴宝等, 2022)。结果表明:岩石饱和单轴抗压强度为35.00~107.00 MPa,平均饱和抗压强度(\bar{R}_b)为63.79 MPa(图8)。地应力测试结果显示测点范围内最大主应力就是最大水平主应力(即 $\sigma_m = S_{H1}$),计算结果列于表3中。

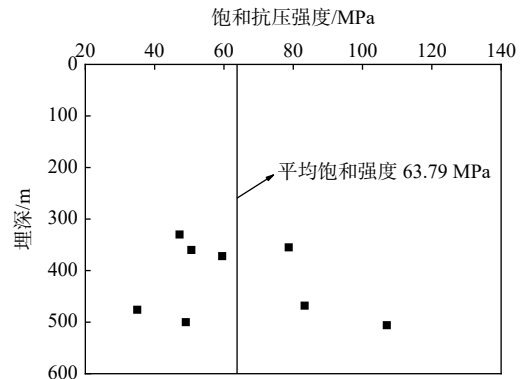


图8 工程区岩石饱和抗压强度与深度的关系

Fig. 8 Relation between saturated compressive strength and depth of rocks in the project area

由表3可以看出,测量深度范围内最大主应力均在 $10 \leq \sigma_m < 20$ 范围内,属于中等地应力水平;而岩石饱和强度应力比 R_b/σ_m 为3.54~5.81,部分数值在3~4之间,综合判定工程区地应力总体为中等地应力级别,局部处于高地应力水平。

5 地应力状态在水电地下工程中的应用

5.1 地应力在地下厂房布置设计中的应用

抽水蓄能电站地下厂房具有跨度大、埋深大等特点,其工程布置关系到工程的稳定性,故如何合理布设水电枢纽地下工程是工程勘察设计的主要研究内容之一。根据工程区地质构造以及岩体应力分布情况,结合工程形状、大小等因素进行综合分析,确定地下厂房长轴线方向。从工程地质角度来说,地下厂房的长轴线方向应与工程区最大主应力方位呈小角度相交(一般小于 30°),有利于地下厂房工程稳定(郭启良等, 2002; 李永松等, 2006; 尹健民等, 2008; 叶更强等, 2015; 刘录君等, 2016)。工程区主应力量级分析结果显示,局部属于高应力级别,而最大主应力方向平均为NE 59.5° ,故地下厂房的长轴线布设在NE 29.5° —NE 89.5° 之间,有利于厂房围岩稳定。

表3 工程区地应力水平综合评判结果

Table 3 Evaluation results of in-situ stress level in the project area

测段深度/m	岩性	σ_m /MPa	地应力水平	\bar{R}_b /MPa	R_b/σ_m	地应力水平	综合地应力水平
355.7	灰岩	10.98	中等地应力	63.79	5.81	中等地应力	中等地应力
370.5	灰岩	12.17	中等地应力	63.79	5.24	中等地应力	中等地应力
388.9	灰岩	12.73	中等地应力	63.79	5.01	中等地应力	中等地应力
453.6	灰岩	17.05	中等地应力	63.79	3.74	高地应力	高地应力
472.2	灰岩	17.03	中等地应力	63.79	3.75	高地应力	高地应力
480.2	灰岩	18.01	中等地应力	63.79	3.54	高地应力	高地应力
421.5	灰岩	12.12	中等地应力	63.79	5.26	中等地应力	中等地应力
438.6	灰岩	14.49	中等地应力	63.79	4.40	中等地应力	中等地应力
467.4	灰岩	15.48	中等地应力	63.79	4.12	中等地应力	中等地应力
493.5	灰岩	15.54	中等地应力	63.79	4.10	中等地应力	中等地应力
497.3	灰岩	16.67	中等地应力	63.79	3.83	高地应力	高地应力
502.1	灰岩	17.62	中等地应力	63.79	3.62	高地应力	高地应力

5.2 地应力状态在输水隧洞衬砌设计中的应用

输水隧洞衬砌形式主要有钢筋混凝土衬砌和钢管衬砌。其中,钢筋混凝土衬砌成本低、施工方便;钢管衬砌安全可靠、成本较高。通常输水隧洞的衬砌设计主要考虑工程区地质构造条件、抗抬理论经验准则和水力劈裂准则等(李永松等, 2006; 尹健民等, 2008)。其中,水力劈裂准则即最小主应力准则,要求引水洞线上任一点的内水压力都不大于岩体中的最小主应力。因此,工程区最小主应力是输水隧洞衬砌设计的重要技术参数。若不考虑最小主应力或主应力偏低,均会给工程后期运营带来不安全因素,甚至造成巨大损失。例如,河南某抽水蓄能电站输水隧洞采用钢筋混凝土衬砌,由于电站运行过程中渗漏量较大,对输水隧洞的上斜井采用了内套钢衬处理措施(王洋和朱建峰, 2012; 陈冬冬和牛正威, 2017),大幅增加了运行维护成本,故依据地应力测试结果合理选择输水隧洞衬砌形式,对水电工程后期运营维护非常重要。

工程区测点的最小水平主应力为最小主应力(即 $S_h = \sigma_3$),故最小主应力值 σ_3 为 6.79~11.32 MPa。而枢纽工程的最大水头 P_H 约为 4.62 MPa,显然 $P_H < \sigma_3$,也就是说,岩体本身具有足够的抵抗最大内水压力的能力,采用钢筋混凝土衬砌,即可满足输水隧洞的稳定性。因此,从地应力角度来看,输水隧洞具备采用钢筋混凝土衬砌形式的条件。

6 讨论

6.1 工程区区域应力场

陈群策等(2010)在山西省南北两端4个地区

13个钻孔内开展了水压致裂地应力测试工作,其中,在北端五台山、雁门关地区 400~600 m 深度内,获得最大水平主应力值为 8~12 MPa,而在南端临汾、运城地区 400~500 m 深度,获得最大水平主应力值为 20~28 MPa。房璐等(2018)基于多个测点的地应力实测数据,建立沁水盆地有限元数值模型,模拟结果表明太原西部古交区块 400~500 m 深度最大主应力值 16.30~17.20 MPa,最大主应力方向为 NE 30°—NE 60°。2009—2015年太原盆地发生 2.0级以上中小地震,震源机制解结果表明区域震源机制解类型以走滑和正断为主,区域最大水平主应力优势方向为北东向和北北东向(郭祥云等, 2017; 李平恩等, 2017; 余占洋等, 2022)。张淑亮发现汶川地震对太原盆地构造应力场的影响较为显著,由震前北北东—南南西向拉张应力的局部小区域应力场转为震后北东东—南西西向挤压应力为主,且接近华北地区应力场(张淑亮等, 2017)。王秀文和杨国华(2017)利用 GPS 资料研究山西地区水平形变,发现了不同时段水平运动存在一定的差别,表明区域应力场存在动态变化。因此,汾渭地堑地区最大主应力值呈现出“南高北低”现象,其方向为北北东—北东东向(图9)。

工程区位于汾渭地堑的中部,355.7~502.1 m 实测最大水平应力值 11~18 MPa,相近的测试深度范围内最大主应力值介于汾渭地堑的南北两端之间;最大主应力方向平均为 NE 43°—NE 70.5°之间,平均为 NE 59.5°,且与工程区及其周缘震源机制解、GPS 位移结果一致(图9),表明测量结果能够代表区域构造应力场最大主应力方向。

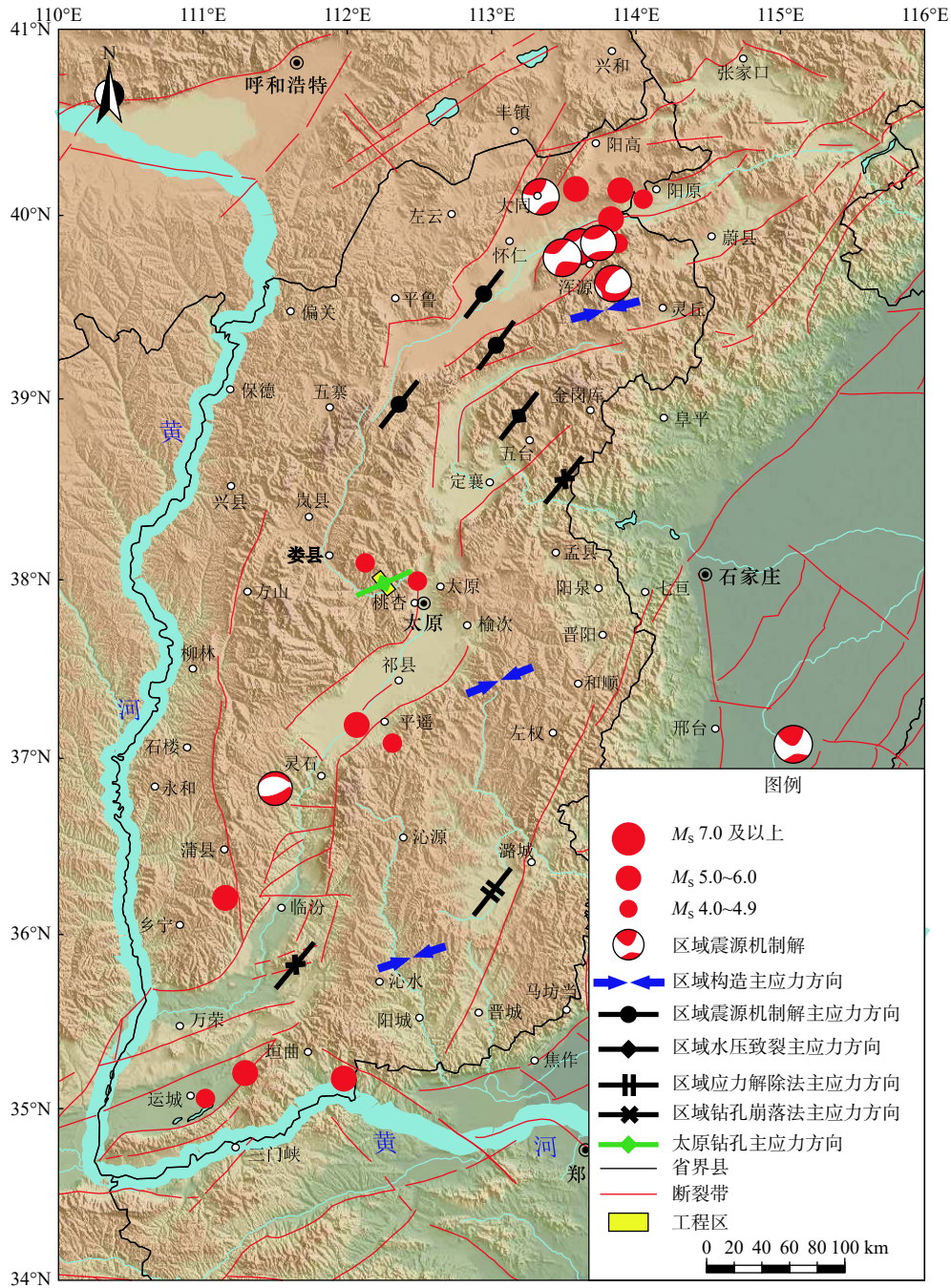


图9 工程区及邻区区域应力场分布与震源机制解特征

Fig. 9 Distribution of stress fields and focal mechanism solution in the project and adjacent areas

6.2 工程区主应力梯度

杨树新等(2012)通过分析中国大陆各活动地块实测地应力特征,获得华北地块最大水平主应力梯度为0.23 MPa/km,最小水平主应力梯度为0.17 MPa/km(谢富仁等, 2004, 2007; 赵德安等, 2007; 赵德安等, 2007; 王艳华等, 2012; 杨树新等, 2012),而太原抽水蓄能电站工程区内地应力测点的最大水平主应力梯度为0.43 MPa/km,最小水平主应力梯度为0.26

MPa/km。故工程区的地应力梯度值较大,且地表主应力值出现负值,表明测点附近受地形地貌影响较大,靠近地表构造应力场作用较弱,但随深度增加,水平构造作用逐渐变强,推测为受华北地块现今构造应力场作用向汾渭地堑呈北西向挤压所致。

7 结论

通过太原抽水蓄能电站工程区2个地应力孔

的地应力测试工作,获得了地应力状态,主要结论如下。

(1)工程区2个测点最大水平主应力为10.98~18.09 MPa,最小水平主应力为6.79~11.32 MPa;侧压系数 K_{av} 为0.92~1.09;主应力关系为 $S_{H1}>S_{H2}>S_{H3}$,为走滑型应力状态。

(2)工程区最大水平主应力方向为NE 43°—NE 70.5°,平均为NE 59.5°,与所在区域震源机制解、GPS位移资料研究结果一致。

(3)通过2个地应力孔330~506 m范围内8组岩石样品室内岩石力学测试,获得饱和岩石单轴抗压强度为35~107 MPa;岩石饱和单轴强度与最大主应力比值(R_0/σ_m)为3.54~5.81,属于中—高应力水平。

(4)从主应力方向考虑,工程区最大主应力方向平均为NE 59.5°,地下厂房长轴线方向位于NE 29.5°—NE 89.5°之间,有利于厂房的围岩稳定。

(5)枢纽工程最大水头 P_H 约4.62 MPa(即 $P_H<\sigma_3$),基于水力劈裂准则可知,岩体本身具有足够抵抗最大内水压力的能力,输水隧洞具备采用钢筋混凝土衬砌的条件,且能满足输水隧洞的稳定性。

此次测试属于工程预可研阶段初步掌握地应力状态。主要围绕水电工程关键部位开展了2个孔的地应力测试工作,获得了地应力实测数据,基本能够代表工程区的地应力状态,但要精细化了解工程区地应力状态及其分布特征,需要增加地应力测试、数值模拟等工作。随着地下厂房勘探平洞开挖和详勘阶段勘探工作的深入,工程区地应力测孔数量增加和地应力反演分析,能够更加全面地了解工程区的地应力分布状态及其分布规律。在地下厂房布置设计和输水隧洞衬砌形式选择方面,文章仅从地应力因素考虑,未结合地下枢纽工程设施的围岩类别、地质构造、节理裂隙等因素进行综合分析,可在下步工作中开展。

致谢:研究工作得到山西省水利水电勘测设计研究院有限公司的郝永刚正高级工程师、张许平正高级工程师、刘占平工程师和相关技术人员的大力支持。同时,也得到中国地质科学院地质力学研究所彭华老师、马秀敏老师的悉心指导,在此表示衷心感谢!

References

BAI J P, PENG H, MA X M, et al., 2013. Hollow inclusion strain gauge geostress measuring instrument in deep borehole and its application example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

32(5): 902-908. (in Chinese with English abstract)

BAO L H, DU Y, GUO Q L, et al., 2017. In-situ stress measurement and research on tectonic stress field distribution law of Chengdu-Lanzhou railway[J]. Journal of Geomechanics, 23(5): 734-742. (in Chinese with English abstract)

BROWN E T, HOEK E, 1978. Trends in relationships between measured *in-situ* stresses and depth[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 15(4): 211-215.

CAI M F, QIAO L, LI H B, 1995. Rock-stress measurement principles and techniques[M]. Beijing: Science Press: 1-27. (in Chinese)

CAI M F, PENG H, MA X M, et al., 2009. Evolution of the *in situ* rock strain observed at Shandan Monitoring Station during the M8.0 earthquake in Wenchuan, China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46(5): 952-955.

CHAI B, GUO J J, GUO X J, et al., 2022. Engineering geological survey report on the pre-feasibility study stage of Taiyuan (Gujiao) pumped Storage Power Station[R]. Taiyuan: Shanxi Water Conservancy and Hydro-power Survey, Design and Research Institute Co., Ltd. (in Chinese)

CHEN D D, NIU Z W, 2017. Selection of lining form for diversion system of a pumped storage power station[J]. Small Hydro Power(4): 35-39. (in Chinese)

CHEN Q C, AN Q M, SUN D S, et al., 2010. Current In-situ stress state of Shanxi basin and analysis of earthquake risk[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 541-548. (in Chinese with English abstract)

FANG L, WANG S, XU K, et al., 2018. Characteristics of current in-situ stress of Qinshui Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 25(4): 413-418. (in Chinese with English abstract)

FENG C J, LI B, LI H, et al., 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 919-937. (in Chinese with English abstract)

GUO Q L, AN Q M, ZHAO S G, 2002. Application of hydraulic fracturing test in the design of Guangzhou pump storage project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21(6): 828-832. (in Chinese with English abstract)

GUO X Y, JIANG C S, WANG X S, et al., 2017. Characteristics of small to moderate focal mechanism solutions stress field of the circum-Ordos block[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 37(7): 675-685. (in Chinese)

HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.

HAN D, ZHAO Z H, YAN B Z, et al., 2022. Status and prospect of China's pumped storage development in 2021[J]. Water Power, 48(5): 1-4, 104. (in Chinese with English abstract)

JING F, SHENG Q, ZHANG Y H, et al., 2007. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(10): 2056-2062. (in Chinese with English abstract)

JING F, LIANG H C, BIAN Z H, et al., 2008. Review of geo-stress measurement method and study[J]. Journal of North China Institute of Water

- Conservancy and Hydroelectric Power, 29(2): 71-75. (in Chinese with English abstract)
- KANG H P, LIN J, ZHANG X, et al., 2010. In-situ stress measurements and distribution laws in Lu'an underground coal mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 31(3): 827-831, 844. (in Chinese with English abstract)
- LI A W, CHEN Q C, SUN D S, et al., 2019-08-30. Emergency discharge module for hydraulic fracturing measuring device: CN, 110185441A[P]. (in Chinese)
- LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: Engineering geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 191-202. (in Chinese with English abstract)
- LI P E, LIAO L, LIU P, 2017. Numerical simulation of relationship between stress field evolution and historical strong earthquakes in Taiyuan basin[J]. Earth Science, 42(9): 1623-1636. (in Chinese with English abstract)
- LI Y S, YIN J M, AI K, et al., 2006. Measurement and analysis of geostress for underground engineering design of Shenzhen pumped storage plant[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 25(S2): 3965-3970. (in Chinese with English abstract)
- LIU L J, TIAN Z Y, ZHENG Y B, et al., 2016. Study of site selection of deep underground powerhouse in Huanggou pumped storage power station[J]. Resources Environment & Engineering, 30(1): 96-99. (in Chinese with English abstract)
- LUO C W, LI H B, LI J R, et al., 2018-01-19. Dry hole pressure relief valve and hydraulic fracturing in-situ stress testing device: CN, 206905955U[P]. (in Chinese)
- LYU C T, 2020. Analysis of in-situ stress and rock burst in surrounding rock of underground powerhouse of Langjiang pumped-storage power station[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower(12): 57-61. (in Chinese with English abstract)
- MENG W, GUO C B, MAO B Y, et al., 2021. Tectonic stress field and engineering influence of China-Nepal Railway Corridor[J]. Geoscience, 35(1): 167-179. (in Chinese with English abstract)
- MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): 537-549. (in Chinese with English abstract)
- National Standard of the People's Republic of China, 2006. Code for hydro-power engineering geological investigation: GB 50287-2006[S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2009. Process analysis of in-situ strain during the M_s 8.0 Wenchuan earthquake-data from the stress monitoring station at Shandan[J]. Acta Geologica Sinica, 83(4): 754-766.
- QIAO E W, PENG H, MA X M, 2019. The surrounding rock condition exploration and construction method analysis of cross-Bohai strait passage[J]. Journal of Geomechanics, 25(4): 563-573. (in Chinese with English abstract)
- SUN D S, CHEN Q C, LI Q, et al., 2019-09-06. A water level pressure difference control valve: CN, 110206509A[P]. (in Chinese)
- WANG X W, YANG G H, 2017. Analysis of horizontal deformation along the Shanxi fault zone by GPS measurement[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 37(11): 1101-1104. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y H, CUI X F, HU X P, et al., 2012. Study on the stress state in upper crust of China mainland based on in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(9): 3016-3027. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y, ZHU J F, 2012. Leakage treatment of steel lining in diversion system of Baoquan pumped storage power station[C]//Collection of papers on the construction of pumped storage power station. Beijing: China Power Press: 328-331. (in Chinese)
- WU M L, SUN L, 2019-06-21. Water discharge device and ground stress measurement system of double-pipe hydraulic fracturing: CN, 109915100A[P]. (in Chinese)
- XIE F R, CUI X F, ZHAO J T, et al., 2004. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(4): 654-662. (in Chinese with English abstract)
- XIE F R, CHEN Q C, CUI X F, et al., 2007. Fundamental database of crustal stress environment in continental China[J]. Progress in Geophysics, 22(1): 131-136. (in Chinese with English abstract)
- YANG S X, YAO R, CUI X F, et al., 2012. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4207-4217. (in Chinese with English abstract)
- YE G Q, FANG D, JIANG Y L, et al., 2015. Underground powerhouse location and axis selection design of Baihetan hydropower station[J]. Zhejiang Hydropower, 43(6): 46-51. (in Chinese with English abstract)
- YIN J M, GUO X F, AI K, et al., 2008. Analysis of in-situ stress measurement and high pressure tunnel's design verification for Qingyuan pumped storage plant[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 25(5): 43-45, 83. (in Chinese with English abstract)
- YU Z Y, SHEN X Z, LIANG H, et al., 2022. The characteristics of major faults and stress field in Weihe-Yuncheng basin constrained by seismic activity and focal mechanism solutions[J]. Seismology and Geology, 44(2): 395-413. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C Y, DU S H, HE M C, et al., 2022. Characteristics of in-situ stress on the western margin of the eastern Himalayan syntaxis and its influence on stability of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(5): 954-968. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG N, LAN H X, LI L P, et al., 2022. Characteristics and implications of in-situ stresses in Southeastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Engineering Geology, 30(3): 696-707. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG S L, LIU R C, WANG X, et al., 2017. The variation characteristics of stress field of the Taiyuan Basin before and after the Wenchuan earthquake[J]. Earthquake Research in China, 33(1): 46-55. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X L, ZHANG G Z, LIU Y, et al., 2021-06-04. A rapid discharge device suitable for ultra-low water level hydraulic fracturing method: CN, 213360088U[P]. (in Chinese)
- ZHAO D A, CHEN Z M, CAI X L, et al., 2007. Analysis of distribution rule of geostress in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(6): 1265-1271. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO X Y, GAN J, SONG X W, et al., 2022. In-situ stress measurement and

high-pressure water pressure test report in the pre-feasibility study stage of Taiyuan (Gujiao) pumped storage power station in Shanxi province[R]. Beijing: Beijing Engineering Corporation Limited. (in Chinese)

附中文参考文献

- 白金朋,彭华,马秀敏,等,2013.深孔空心包体法地应力测量仪及其应用实例[J].岩石力学与工程学报,32(5):902-908.
- 包林海,杜义,郭啟良,等,2017.成兰铁路地应力测量与构造应力场分布规律研究[J].地质力学学报,23(5):734-742.
- 蔡美峰,乔兰,李华斌,1995.地应力测量原理和技术[M].北京:科学出版社:1-27.
- 柴宝,郭俊君,郭晓娟,等,2022.太原(古交)抽水蓄能电站工程预可研阶段工程地质勘察报告[R].太原:山西省水利水电勘测设计研究院有限公司.
- 陈冬冬,牛正威,2017.某抽水蓄能电站引水系统衬砌形式的选择[J].小水电(4):35-39.
- 陈群策,安其美,孙东生,等,2010.山西盆地现今地应力状态与地震危险性分析[J].地球学报,31(4):541-548.
- 房璐,王硕,徐珂,等,2018.山西沁水盆地现今地应力特征[J].断块油气田,25(4):413-418.
- 丰成君,李滨,李惠,等,2022.南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J].地质力学学报,28(6):919-937.
- 郭啟良,安其美,赵仕广,2002.水压致裂应力测量在广州抽水蓄能电站设计中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,21(6):828-832.
- 郭祥云,蒋长胜,王晓山,等,2017.鄂尔多斯块体周缘中小地震震源机制及应力场特征[J].大地测量与地球动力学,37(7):675-685.
- 韩冬,赵增海,严秉忠,等,2022.2021年中国抽水蓄能发展现状与展望[J].水力发电,48(5):1-4,104.
- 景锋,盛谦,张勇慧,等,2007.中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,26(10):2056-2062.
- 景锋,梁合成,边智华,等,2008.地应力测量方法研究综述[J].华北水利水电学院学报,29(2):71-75.
- 康红普,林健,张晓,等,2010.潞安矿区井下地应力测量及分布规律研究[J].岩土力学,31(3):827-831,844.
- 李阿伟,陈群策,孙东生,等,2019-08-30.一种水压致裂测量装置用紧急泄水组件:中国,110185441A[P].
- 李彬,张文,文冉,2022.陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J].地质力学学报,28(2):191-202.
- 李平恩,廖力,刘盼,2017.太原盆地应力场演化与强震关系的数值模拟研究[J].地球科学,42(9):1623-1636.
- 李永松,尹健民,艾凯,等,2006.深圳抽水蓄能电站地应力测试分析及其在地下洞室设计中的应用[J].岩石力学与工程学报,25(S2):3965-3970.
- 刘录君,田作印,郑以宝,等,2016.荒沟抽水蓄能电站深埋地下厂房位置研究[J].资源环境与工程,30(1):96-99.
- 罗超文,李海波,李俊如,等,2018-01-19.干孔泄压阀及水压致裂地应力测试装置:中国,206905955U[P].
- 吕城腾,2020.浪江抽水蓄能电站地下厂房地应力及洞室围岩岩爆分析[J].广东水利水电(12):57-61.
- 孟文,郭长宝,毛邦燕,等,2021.中尼铁路交通廊道现今构造应力场及其工程影响[J].现代地质,35(1):167-179.
- 孟文,田涛,孙东生,等,2022.基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J].地质力学学报,28(4):537-549.
- 乔二伟,彭华,马秀敏,2019.渤海海峡跨海通道围岩条件探查与施工方法分析[J].地质力学学报,25(4):563-573.
- 孙东生,陈群策,李全,等,2019-09-06.一种水位压差控制阀:中国,110206509A[P].
- 王秀文,杨国华,2017.利用GPS资料研究山西裂谷带的水平形变[J].大地测量与地球动力学,37(11):1101-1104.
- 王艳华,崔效锋,胡幸平,等,2012.基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究[J].地球物理学报,55(9):3016-3027.
- 王洋,朱建峰,2012.宝泉抽水蓄能电站引水系统钢衬渗漏处理[C]/抽水蓄能电站工程建设文集.北京:中国电力出版社:328-331.
- 吴满路,孙林,2019-06-21.泄水装置及双管水压致裂地应力测量系统:中国,109915100A[P].
- 谢富仁,崔效锋,赵建涛,等,2004.中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J].地球物理学报,47(4):654-662.
- 谢富仁,陈群策,崔效锋,等,2007.中国大陆地壳应力环境基础数据库[J].地球物理学进展,22(1):131-136.
- 杨树新,姚端,崔效锋,等,2012.中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J].地球物理学报,55(12):4207-4217.
- 叶更强,方丹,江亚丽,等,2015.白鹤滩水电站地下厂房位置及轴线选择设计[J].浙江水利科技,43(6):46-51.
- 尹健民,郭喜峰,艾凯,等,2008.清远抽水蓄能电站地应力测试分析与高压隧洞设计验证[J].长江科学院院报,25(5):43-45,83.
- 余占洋,沈旭章,梁浩,等,2022.基于地震活动性和震源机制解研究渭河-运城盆地主要断裂带的特征及应力场分布[J].地震地质,44(2):395-413.
- 张重远,杜世回,何满潮,等,2022.喜马拉雅东构造结西缘地应力特征及其对隧道围岩稳定性的影响[J].岩石力学与工程学报,41(5):954-968.
- 张宁,兰恒星,李郎平,等,2022.青藏高原东南缘实测地应力特征及意义分析[J].工程地质学报,30(3):696-707.
- 张淑亮,刘瑞春,王霞,等,2017.汶川地震前后太原盆地应力场变化特征研究[J].中国地震,33(1):46-55.
- 张小林,张广泽,刘毅,等,2021-06-04.一种适用于超低水位水压致裂法急速泄水装置:中国,213360088U[P].
- 赵德安,陈志敏,蔡小林,等,2007.中国地应力场分布规律统计分析[J].岩石力学与工程学报,26(6):1265-1271.
- 赵晓阳,甘俊,宋宪文,等,2022.山西省太原(古交)抽水蓄能电站预可行性研究阶段地应力测量及高压压水试验报告[R].北京:中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2016.水力发电工程地质勘察规范:GB 50287-2016[S].北京:中国计划出版社.