

## 安徽桐城抽水蓄能电站输水系统衬砌型式分析及评价

戴兵国

广东省水利电力勘测设计研究院有限公司, 广东 广州 510170

**[摘要]**文中从三个方面对大型抽水蓄能电站输水系统采用钢筋混凝土衬砌进行了分析,从技术要求和节省投资两方面对衬砌型式进行选择。安徽桐城抽水蓄能电站高压隧洞总体工程地质条件较好,中平洞与下竖井上弯段埋深稍浅,其它部位埋深较大,地应力亦大于内水压力,围岩透水性大多微弱,局部发育渗水较大的断层和裂隙密集带,输水系统局部灌浆处理后采取钢筋混凝土衬砌型式是合适的。

**[关键词]**最小覆盖厚度准则;最小主应力准则;围岩渗透准则

DOI: 10.33142/ec.v4i11.4779

中图分类号: TV223.4

文献标识码: A

### Lining Type Analysis and Evaluation of Water Conveyance System of Tongcheng Pumped Storage Power Station in Anhui Province

DAI Bingguo

Guangdong Water Resources and Electric Power Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 510170, China

**Abstract:** This paper analyzes the use of reinforced concrete lining in the water conveyance system of large pumped storage power station from three aspects, and selects the lining type from two aspects of technical requirements and saving investment. The overall engineering geological conditions of the high-pressure tunnel of Tongcheng pumped storage power station in Anhui Province are good. The buried depth of the middle adit and the upper bend section of the lower shaft is slightly shallow, the buried depth of other parts is large, the crustal stress is also greater than the internal water pressure, the water permeability of the surrounding rock is mostly weak, and the fault and fissure dense zone with large water seepage are developed locally. It is appropriate to adopt the reinforced concrete lining type after local grouting treatment of the water conveyance system.

**Keywords:** minimum cover thickness criterion; minimum principal stress criterion; surrounding rock permeability criterion

#### 引言

抽水蓄能电站高压隧洞的衬砌型式主要有钢筋混凝土衬砌和钢板衬砌两种型式,从投资角度看,采用钢筋混凝土衬砌可以大大节省投资<sup>[1]</sup>。根据已有工程的成功经验,若不衬砌或采用钢筋混凝土衬砌,即由隧洞围岩承载水压力,则隧洞周围必须要有足够的岩层覆盖厚度、足够的地应力,在此基础上围岩还不能产生过大的渗漏和发生渗透破坏<sup>[2]</sup>。经归纳总结为三个常用的不衬砌或混凝土衬砌隧洞围岩承载设计准则,即最小覆盖厚度准则、最小主应力准则和围岩渗透准则。

#### 1 工程应用

##### 1.1 最小覆盖厚度准则

岩体覆盖厚度是影响输水隧洞安全的一个主要因素<sup>[3]</sup>。桐城抽水蓄能电站输水系统除上、下库进/出水口处和上平洞接上竖井转弯段围岩覆盖厚度稍薄外,其它洞段覆盖厚度 120~340m。上水库正常蓄水位 540.3m,压力管道内水最大静水头约 50.1m~450.3m。

根据《水工隧洞设计规范》DL/T5195-2004,有压隧洞洞身部位岩体最小覆盖厚度按下式进行计算判断:

$$CRM = h_s \gamma_w F / \gamma R \cos \alpha$$

式中:  $\gamma R$  为岩体的重度,取 26.5kN/m<sup>3</sup>;

CRM 为岩体最小覆盖厚度(不包括全、强风化层厚度, m);

$\alpha$  为山坡坡面倾角,当  $\alpha$  大于 60° 时,取 60°;

F 为经验系数,1.3~1.5,取 1.5;

$\gamma_w$  为水的重度,取值 10kN/m<sup>3</sup>;

$h_s$  为洞内静水压力水头, m。

根据桐城抽水蓄能电站工程地形、地质及输水系统布置情况,取 9 个代表性部位作为计算点,输水系统各建筑物部位岩体最小覆盖厚度计算成果详见表 1。

除中平洞末端和下竖井上弯段最小覆盖厚度经验系数小于 1.3, 不满足要求外, 引水隧洞其余洞段最小覆盖厚度均满足要求, 围岩整体稳定。

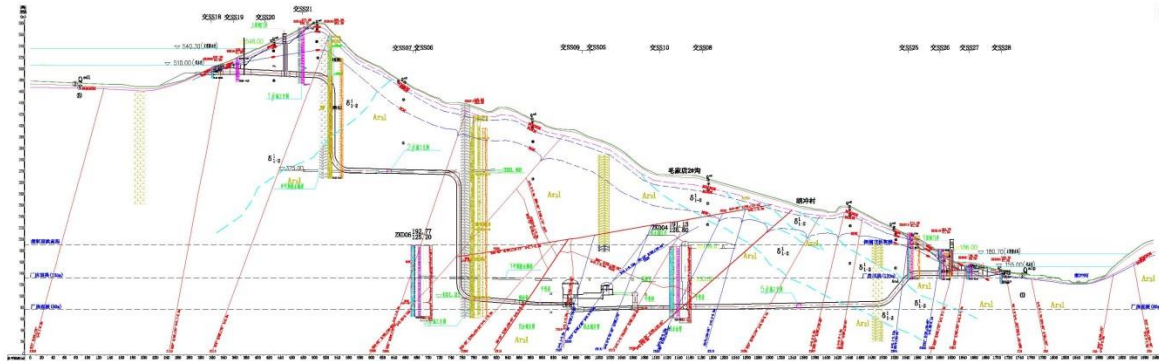


图 1 输水发电系统推荐方案工程地质剖面示意图

表 1 输水隧洞最小覆盖厚度计算成果表 (沿 1#机)

部位	洞段长度(m)	隧洞中心高程(m)	岩体最小覆盖厚度(m)	静水头 $h_s$ (m)	坡角 $\alpha$ (°)	经验系数 F	评价
上平洞	30.811	490.235	73	50.1	40	2.90	满足要求
上竖井上弯段	51.708	479.711	55	60.6	45	1.67	满足要求
上竖井下弯段	52.727	334.47	170	205.8	32	1.82	满足要求
中平洞末端	163.807	321.059	103	219.2	25	1.11	不满足要求
下竖井上弯段	40.321	313.264	105	227.0	10	1.18	不满足要求
下竖井下弯段	38.765	107.58	308	432.7	18	1.76	满足要求
下平洞	88.394	92.728	312	447.6	18	1.72	满足要求
引水支管及岔管	70.796	90	287	450.3	20	1.56	满足要求

注: 表中上平洞洞段长度从闸门井后渐变段末端起算, 不包含闸门井前隧洞段。

引水隧洞穿过近南北向山体, 沿山坡较缓, 冲沟不发育, 切割较浅, 地形较完整, 隧洞侧向埋深大于垂直埋深, 在引水隧洞选择 8 个控制性的点计算其覆盖厚度比及视安全系数, 见表 2、表 3。

表 2 引水系统各建筑物覆盖比计算表 (沿 1#机)

工程名称	控制点号	位置	洞中心高程 (m)	洞内静水压力水头 P (m)	从地表起算				从弱风化带顶面起算			
					垂直埋深 H (m)	覆盖厚度比 H/P	覆盖重力 G $G=H*\gamma$	视安全系数 K $K=G/P$	垂直埋深 H (m)	覆盖厚度比 H/P	覆盖重力 G $G=H*\gamma$	视安全系数 K $K=G/P$
输水隧洞	1	上平洞	490.235	50.1	89	1.78	226.95	4.53	73	1.46	193.45	3.86
	2	上竖井上弯段	479.711	60.6	70	1.16	178.5	2.95	55	0.91	145.75	2.41
	3	上竖井下弯段	334.47	205.8	185	0.90	471.75	2.29	170	0.83	450.5	2.19
	4	中平洞末端	321.059	219.2	121	0.55	308.55	1.41	103	0.47	272.95	1.25
	5	下竖井上弯段	313.264	227	125	0.55	318.75	1.40	105	0.46	278.25	1.23
	6	下竖井下弯段	107.58	432.7	323	0.75	823.65	1.90	308	0.71	816.2	1.89
	7	下平洞	92.728	447.6	329	0.74	838.95	1.87	312	0.70	826.8	1.85
	8	引水支管及岔管	90	450.3	302	0.67	770.1	1.71	287	0.64	760.55	1.69
高压隧洞 (含高岔支管) 覆盖厚度比及 K 变化范围						0.55~1.78		1.40~4.53		0.46~1.46		1.23~3.86

可见, 从弱风化带顶面起算, 覆盖厚度比  $\lambda=0.46\sim 1.46$ , 视安全系数  $K=1.23\sim 3.86$ , 高压隧洞各洞段的岩体重量能够承受全部内水压力, 山体不会上抬, 上覆岩体满足抗抬要求。

综上分析, 桐城抽水蓄能电站工程输水隧洞上覆岩体总体厚实, 岩体较完整~完整, 局部完整性差, 除引水中平洞下游段至下竖井上弯段不满足最小覆盖厚度的要求外, 引水隧洞其它洞段满足要求。

### 1.2 最小主应力准则

根据最小地应力准则要求, 砼衬砌高压隧洞沿线任一点的围岩最小主应力  $\sigma_3$  应大于该点洞内静水压力, 并有 1.2~1.3 倍的安全系数, 以防止发生围岩水力劈裂破坏。

本阶段在钻孔 ZK3010、ZK3011 和 ZKD06 中进行了水压致裂法和应力解除法地应力测试, 下平洞及高压岔管部位引水隧洞中线设计高程为 101.2~90.0m, 对应 ZK3011 钻孔深度 320~331m、ZKD06 钻孔深度 92~103m。

对应深度范围的测试结果统计: 下平洞、岔管实测最小水平主应力值  $\sigma_h=6.7\sim 14.0$ MPa, 最小主应力  $\sigma_3=6.9\sim 9.6$ MPa, 岔管内最大静水压力  $P=4.503$ MPa,  $\sigma_h/P=1.49\sim 3.11$ ,  $\sigma_3/P=1.53\sim 2.13$ 。

下竖井高程 313.264m~107.58m, 实测最小水平主应力值  $\sigma_h=3.0\sim 11.9$ MPa, 最小主应力  $\sigma_3=4.5$ MPa~9.3MPa, 静水压力  $P=2.27$ MPa~4.32MPa,  $\sigma_h/P=1.32\sim 2.75$ ,  $\sigma_3/P=1.98\sim 2.15$ 。

中平洞中心线高程 320.55m~325.00m, ZK3010 实测最小水平主应力值  $\sigma_h=6.6\sim 7.3$ MPa, 未做解除法; ZK3011 在孔深 119.3m(高程 301.52m)测得最小水平主应力值  $\sigma_h=3.0$ MPa, 孔深 91.4m(高程 329.42m)测得最小主应力  $\sigma_3=2.0$ MPa, 浅部受地形影响较大, 地应力值偏小, 由于 ZK3011 相距中平洞较远, 仅能参考; 中平洞静水压力  $P=2.15$ MPa~2.19MPa,  $\sigma_h/P=3.01\sim 3.33$ ,  $\sigma_3/P=0.93\sim 0.91$ 。

上竖井轴线设计高程 325.00m~493.37mm, 对应 ZK3010 钻孔深度 68~237m。对应深度范围的测试结果统计: 实测最小水平主应力值  $\sigma_h=5.5\sim 8.4$ MPa, 对应最大静水压力  $P=1.26$ MPa~2.17MPa,  $\sigma_h/P=3.04\sim 4.37$ 。

根据 SZK17、ZK3011、ZKD03 和 ZKD06 钻孔最大、最小水平主应力随深度变化的相关关系式, 推算输水发电系统各主要建筑物水平主应力成果及地应力回归分析成果见表 3 和表 4。

表 3 输水发电系统各点抗水力劈裂参数表

工程名称	控制点号	位置	洞中心高程 (m)	洞内静水压力水头 P (MPa)	岩体最小覆盖厚度 (m)	水压致裂试验		应力解除试验	
						最小水平主应力 $\sigma_h$ (MPa)	抗水力劈裂参数 ( $\sigma_h/P$ )	最小主应力 $\sigma_3$ (MPa)	抗水力劈裂参数 ( $\sigma_3/P$ )
高压隧洞	1	上平洞	490.235	50.1	73	/	/	/	/
	2	上竖井上弯段	479.711	60.6	55	/	/	/	/
	3	上竖井下弯段	334.47	205.8	170	4.37	2.12	4.51	2.19
	4	中平洞	321.059	219.2	103	2.65	1.21	2.37	1.08
	5	下竖井上弯段	313.264	227	105	2.7	1.19	2.78	1.22
	6	下竖井下弯段	107.58	432.7	308	7.92	1.83	8.18	1.89
	7	下平洞	92.728	447.6	312	8.02	1.79	8.29	1.85
	8	引水支管及岔管	90	450.3	287	7.38	1.64	7.62	1.69
变化范围值			/	/	/	/	1.19~2.12	/	1.08~2.19

表 4 输水隧洞重点部位视安全系数表

点号	控制点位置	隧洞中心高程	最大静水头	抗抬理论准则		最小主应力准则			
				埋深	覆盖厚度比	地应力实测值		地应力回归值	
						最小主应力	抗劈裂参数	最小主应力	抗劈裂参数
1	上平洞	490.235	50.1	73	1.46	—	—	1.2	2.40
2	上竖井上弯段	479.711	60.6	55	0.91	—	—	1.25	2.06

点号	控制点位置	隧洞中心 高程	最大静水 头	抗抬理论准则		最小主应力准则			
				埋深	覆盖厚度比	地应力实测值		地应力回归值	
						最小	抗劈裂	最小	抗劈裂
						主应力	参数	主应力	参数
/m	$P_0/m$	/m	$\lambda = H/P_0$	$\sigma_3/MPa$	$\sigma_3/P_0$	$\sigma_3/MPa$	$\sigma_3/P_0$		
3	上竖井下弯段	334.47	205.8	170	0.83	2.6	1.26	4.42	2.15
4	中平洞末端	321.059	219.2	103	0.47	2.9	1.32	4.4	2.01
5	下竖井上弯段	313.264	227	105	0.46	3.1	1.37	4.46	1.96
6	下竖井下弯段	107.58	432.7	308	0.71	9.05	2.09	8.54	1.97
7	下平洞	92.728	447.6	312	0.70	7.6	1.70	9.08	2.03
8	引水支管及岔管	90	450.3	287	0.64	6.6	1.47	8.13	1.81

备注：5~8点地应力实测值 $\sigma_3$ 数据分别采用钻孔 ZK3011、ZKD06 和 ZKD03 解除法数据，为对应高程的测点数据或上下测点均值。

从上述数据判断，高岔和高压隧洞大多数洞段的最小水平主应力和最小主应力 $>$ 最大静水压力，且大于 1.2 倍，仅在中平洞末端与下竖井上弯段部位，埋深稍浅，地应力值稍低，需进行加固处理或加大埋深；总体上，高压隧洞基本满足最小主应力准则要求，少数洞段余度稍小。

### 1.3 渗透准则

岩体内存在大量的节理裂隙，而裂隙中又往往有夹泥（膜）或碎屑物充填，当输水隧洞衬砌开裂时，在一定压力渗透水流的长期作用下，岩体有可能产生渗透变形破坏，因此，渗透准则的原理是检验岩体的渗透性及是否满足渗透稳定要求，即内水外渗量不随时间的延长而持续增加或突然增加。根据《水工隧道设计规范》（DL/T5195-2020），在设计内水压力作用下围岩的透水率或经灌浆后的围岩透水率应小于或等于 1.0Lu；根据以往工程经验，II~III类围岩的长期稳定渗透水力梯度一般控制在 10~15 以内。

除常规压水试验外，在位于高压隧洞附近的钻孔 ZK3010、ZK3011、SZK17 和探洞内 ZKD06 还进行了高压压水试验，试验成果显示岩体以微透水和极微透水为主，局部弱透水和中等透水。

ZK3010 钻孔高压压水试验压力~流量（P~Q）关系曲线类型：属于 D 型（冲蚀型）有 4 段，占 80%，拐点明显；属于 E 型（充填型）有 1 段，占 20%。以 D 型为主。岩体透水率 q 值在 0.36Lu~0.42Lu 之间，均小于 1Lu，岩体呈极微透水~微透水，相应压力下的流量为 10.5~12.5L/min。在孔口测试压力 1.0~6.0MPa 的情况下，各测段透水率变动范围为 0.34~0.99Lu。引水上平洞围岩岩体呈微透水性，一般不会发生渗透变形破坏，围岩满足抗渗稳定要求。

ZK3011 孔高压压水试验压力~流量（P~Q）关系曲线类型：属于 D 型（冲蚀型）有 8 段，占 57%，拐点明显；属于 E 型（充填型）有 6 段，占 43%。岩体透水率 q 值在 0.23Lu~1.56Lu 之间，除有 1 段大于 1Lu 外，其余均小于 1Lu，岩体呈极微透水~微透水，相应压力下的流量为 0.3~19.0L/min。在孔口测试压力 1.0~6.0MPa 的情况下，孔深小于 190m 测段高压压水过程中被劈裂；258.4~262.4m 测段在孔口压力大于 1.0MPa 后流量迅速增加，透水率最大 1.56Lu；高压压水试验过程中未劈裂测段透水率小于 1.0Lu。

SZK17 钻孔高压压水试验压力（P）~流量（Q）关系曲线类型：属于 A 型（层流型）有 9 段，占总测试段数的 23%；属于 B 型（紊流型）有 6 段，占总测试段数的 15%；属于 C 型（扩张型）有 10 段，占 25%；属于 D 型（冲蚀型）有 15 段，占 38%。全孔闪长岩脉及接触段中共有 26 个试验段，试段曲线以 C 型和 D 型为主，占全孔 C 型试段的 70%（7 段）和 D 型的 87%（13 段），试验结果反映岩脉段虽然岩体完整性好，但裂隙面多有铁锰质渲染，连通性强，在高压状态下渗透流量较大，透水性较强，沿裂隙易产生冲蚀性破坏。

探洞 PD01 内高压岔管部位 ZKD06 钻孔，最高试验压力按为 6.2MPa~7.1MPa。压力~流量（P~Q）关系曲线类型属于 A 型（层流型）有 5 段，占总测试段数的 50%，曲线陡立，总流量小；属于 D 型（冲蚀型）有 3 段，占 30%，拐点明显；属于 E 型（充填型）有 2 段，占 20%。以 A 型为主。岩体透水率 q 值在 0.36Lu~0.42Lu 之间，均小于 1Lu，岩体呈极微透水~微透水，相应压力下的流量为 10.1~10.4L/min。孔口测试压力 1.0~6.0MPa 的情况下，无测段在压水过程中被劈裂。

根据输水系统 3 个深孔地下水位长观资料，结合探洞 PD01 开挖揭露综合分析，钻孔中沿陡倾角裂隙的渗漏段应属

局部现象,无明显规律,输水系统与地下厂房区不构成连通的渗漏带。

高压压水试验成果说明输水系统大部分围岩微透水~极微透水,部分围岩裂隙发育部位渗透性较大,在高压水流的长期作用下,岩体可能劈裂并产生扩张、冲蚀,尤其是岩脉、断层破碎带及节理裂隙发育部位。因此,从高压压水试验的结果来看,输水系统沿线大部分段围岩基本满足渗透准则,局部透水性较大,若采用钢筋混凝土衬砌需加强灌浆等处理措施。

在 ZK3010、ZK3011 和 ZKD06 钻孔中进行了水力劈裂试验:

上竖井部位 ZK3010 钻孔在孔深 198.0~244.3m 范围进行了 5 个测段的水力劈裂试验,最小劈裂压力为 7.0MPa。

下平洞高岔部位 ZK3011 钻孔在孔深 97.8~350.0m 范围进行了 14 个测段的劈裂压力测试,实测完整测段最小劈裂压力为 5.4MPa(高程 281.82m~285.82m)。孔深 258.4~262.4m(高程 162.42m~158.42m)测段孔口压力读数大于 1.0MPa(试验压力 3.6MPa)后渗流量迅速增加,测试部位裂隙发育或为断层破碎带。

高压岔管部位 ZKD06 钻孔在孔深 17.2~121.2m 范围获得 10 个测段的劈裂压力测试结果,测段最小劈裂压力 6.7MPa(高程 123.27m~127.27m)。

完整测段水力劈裂实测劈裂压力均大于对应高程的内水压力,最小为 5.4MPa,实测部位的围岩满足抗劈裂要求,在裂隙密集带和断层破碎带水力劈裂压力较小,小于内水压力,易产生劈裂,是内水外渗的主要部位。

#### 1.4 衬砌型式地质条件分析

根据以上高压隧洞沿线最小覆盖厚度、地应力、岩体渗透性条件等分析,除中平洞与下竖井连接段埋深稍浅,地应力稍低外,其它部位覆盖厚度和地应力均满足钢筋混凝土衬砌的要求;高压隧洞围岩以 II 类为主,局部夹 III 类,透水率以  $q < Lu$  为主,岩体渗透性以微弱~极微为主,满足抗水力劈裂要求,仅在局部裂隙密集带、断层破碎带透水率大于  $1Lu$ ,在探洞和钻孔发现个别裂隙和断层渗水较大,弱~中等透水,易产生劈裂,需进行防渗补强处理。总体上,高压隧洞围岩工程地质条件较好,基本满足钢筋混凝土衬砌的要求。

根据探洞和钻孔揭露,存在透水性较大的裂隙和断层。探洞内地下水活动总体弱,洞壁干燥,局部沿节理面渗、滴水,主要沿近 NNE 向、NE 向中陡倾角和 NW 向中陡倾角结构面以渗、滴水形式出露,局部沿断层、节理等出现小股线流和涌水。在主探洞 PD01 桩号 0+850~0+860m(NE 向裂隙密集带)、0+890~0+900m(NEE 向小断层  $f_{321}$ )和 1+045m(NE 向裂隙性断裂  $f_{324}$ )3 处集中渗水,呈线流状,流量分别为  $q=30\sim 40L/min$ 、 $q=18\sim 20L/min$ 、 $q=25\sim 28L/min$  和  $q=3\sim 5L/min$ ,流量稳定。对应下平洞和下竖井高压隧洞。ZK3011 孔在孔深 146m~150m(高程 274.82m~270.82m)顺陡倾角裂隙渗漏严重,钻进无回水,对应下竖井中段。以上说明,高压隧洞存在透水性强的断层和裂隙,存在高压内水外渗的问题,采用钢衬或灌浆处理可有效解决。

## 2 结论

高压隧洞总体工程地质条件较好,中平洞与下竖井上弯段埋深稍浅,其它部位埋深较大,地应力亦大于内水压力,围岩透水性大多微弱,局部发育 NEE、NE 和 NW 向的渗水较大的断层和裂隙密集带,输水系统局部灌浆处理后采取钢筋混凝土衬砌型式是合适的,或下平洞、高压岔管透水性强的部位采用钢衬,其他部位采取钢筋混凝土衬砌型式。

#### [参考文献]

- [1]刘克勤.某抽水蓄能电站岩溶地层库盆防渗研究与评价[J].福建建设科技,2016(3):9-10.
  - [2]周春华,王金山.抽水蓄能电站工程建设场地地质灾害危险性评估[J].山西建筑,2014,40(28):60-61.
  - [3]傅迪,宁卫琦.大雅河抽水蓄能电站输水系统设计[J].东北水利水电,2021,39(5):15-17.
  - [4]张国荣.泰山抽水蓄能电站地下洞室群安全稳定性分析研究[D].山东:山东大学,2015.
  - [5]李君,杨欢等.基于组合赋权法的抽水蓄能电站 EPC 总承包业主风险评价[J].水利规划与设计,2020(4):136-141.
- 作者简介:戴兵(1978.2-)男,河海大学,水文地质及工程地质,广东省水利电力勘测设计研究院有限公司,地质工程院副总工程师,高级工程师。