•水工岩石力学•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500055

本刊网刊

外水压力折减系数对抽蓄电站深孔高压压水试验参数的影响研究

杨文超，范新宇，任　超，宋明刚，陈国将

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710100)

摘　要：抽水蓄能电站建设正处于高速发展时期，测试钻孔深度也有不断增加的趋势，因此深孔高压压水试验参数成果的准确性对抽水蓄能电站意义重大。为研究现行规范中的计算方法对深孔高压压水试验参数计算的适用性，推导验证了目前高压压水试验压力计算零线的规定是基于不考虑外水压力折减系数假设的，这种假设在深孔参数计算中会造成不可忽略的误差。为此，在试验压力计算中引入外水压力折减系数，提出了考虑外水压力折减系数的附加水压力计算公式，以更加合理地计算深孔高压压水试验参数。将该计算方法应用到陕西某抽水蓄能电站工程厂房深孔测试中，结果表明：在完整和较完整花岗岩地层中，高压压水试验的压力–流量（P–Q）曲线破坏类型为“前段层流型、后段开裂型”的综合型曲线。采用规范法计算的高压压水试验透水率为0.19～0.26 Lu，采用折减系数法计算的透水率为0.12～0.14 Lu，相对前者下降36.0%～41.8%。高压压水试验与常规压水试验的透水率比值为12.0～16.9，高压压水试验的透水率远大于常规压水试验。规范法计算所得劈裂压力范围为5.53～7.82 MPa，折减系数法计算所得劈裂压力范围为10.14～12.20 MPa，折减系数法求得的劈裂压力值远大于规范法。相比规范法，改进后的折减系数法可以更加合理地反映岩体透水率和劈裂压力，从而更好地发挥岩体抵抗渗透破坏的潜力，对优化设计方案和节约工程造价具有重要参考意义。

关键词：抽水蓄能电站；高压压水试验；外水压力折减系数；劈裂压力；透水率

中图分类号：TV221　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2096-3246（2026）01-0090-11

随着全球气候变化和能源转型的紧迫性日益凸显，“双碳”目标已成为中国能源发展的重要推力和发展方向[1–2]。在此背景下，抽水蓄能电站作为清洁能源的重要组成部分，因其在电网调峰、调频、紧急备用等方面的重要作用，迎来了前所未有的发展机遇[3]。

抽水蓄能电站工作水头一般为400～600 m，因其上、下水库水位差大、工作水头高的特点，在工程运行中对引水隧洞、高压岔管等关键部位的围岩提出了极高的要求[4]，这些部位必须承受较高的水压力，面临高渗压差和高水力梯度的考验。岩体的抗渗性能主要取决于自身特性和完整性，而岩体内不可避免地存在各种节理、裂隙等结构面，当承受的水压力达到或超过结构面的承受极限时，岩体渗透特性会发生改变，往往在低压下呈现微透水或弱透水的岩层，在高水压下透水性会明显变强，甚至发生水力劈裂破坏，从而对工程的正常运行造成影响[5]。因此对于高水头部位岩体开展压水试验时，应根据岩体实际承受的水头压力进行压水测试，才能真实反映岩体的渗透特性。常规的钻孔压水试验最高试验压力仅为1.0 MPa，这显然无法真实反映岩体在高水头压力下的渗透特征，因此研究高水头压力下的岩体渗透特征通常采用高压压水试验[6]。通过高压压水试验获取岩体渗透参数并作为设计依据，已成为抽水蓄能电站勘察设计中不可或缺的工作流程[7]。王斌等[8]对湖南桂阳抽水蓄能电站高压引水隧洞部位开展了高压压水试验，钻孔深度415 m，根据成果对隧洞稳定性进行了分析；刘录君等[9]对黑龙江荒沟抽水蓄能电站高压岔管部位进行了高压压水试验，钻孔深度433 m；韩国强等[10]对某抽水蓄能电站高压岔管部位进行了高压压水试验，钻孔深度270 m；陈万林[11]对江西赣县抽水蓄能电站高压岔管进行了高压压水试验，孔深301 m。可以看出，目前在抽水蓄能电站高压压水试验中浅孔较少深孔居多，且随着技术的进步，试验钻孔深度会进一步增加。然而目前《水电工程钻孔压水试验规程》（NB/T 35113—

收稿日期：2025－01－23　　**修回日期：**2025－06－08　　**网络出版日期：**2025－06－16

作者简介：杨文超（1988—），男，高级工程师，硕士．研究方向：水利水电工程地质勘察．E-mail：yangwc@nwh.cn

2018)[12]、《工程地质手册》[13]等规范和资料中对于高压压水试验参数的计算方法(以下简称“规范法”)借鉴常规压水试验，对压力计算零线的假定也完全相同，在浅孔中由于水位差小，这种假定误差反馈不明显，但在深孔中是否适用目前研究较少。

外水压力折减系数是指实际外水压力与天然条件下的静水压力的比值[14]，相关研究成果表明，外水压力折减系数在地下建筑物水头计算中不可忽略，在深埋隧洞中影响更加显著[15]，朱才辉等[16-17]对引汉济渭工程饱和Q_2黄土的外水压力折减系数进行模型试验和数值计算，得出其范围为0.35～0.75；戚海棠等[18]基于地下水渗流原理推求了圆形隧洞外水压力折减系数解析计算公式，认为围岩的渗透性是影响折减系数的主要因素；刘彦文等[19]通过分析煤矿斜井地下水渗流过程中水力学特性和地层性质等因素引起的水头折减，得出外水压力折减系数的解析式。然而目前外水压力折减系数多用于隧洞衬砌计算，在钻孔中的应用较少。

本文讨论了规范法对深孔高压压水试验参数计算的适宜性，并将外水压力折减系数引入深孔高压压水试验中，提出了考虑外水压力折减系数的高压压水试验附加水压力计算方法(以下简称“折减系数法”)，从而能够获得更加合理的试验参数，对抽水蓄能电站设计优化具有重要参考意义。

1　工程概况及基本地质条件

1.1　工程概况

陕西某抽水蓄能电站位于陕西省商洛市境内，站址距离商洛市约50 km，距离西安市约170 km。电站为日调节纯抽水蓄能电站，工程枢纽由上水库、下水库、输水系统、厂房及开关站等建筑物组成。上水库为新建水库，正常蓄水位1 358.0 m，死水位1 334.0 m，下水库利用已建成水库，正常蓄水位728.0 m，死水位700.5 m，额定水头616 m，装机规模1 400 MW，引水隧洞长度约4.3 km，距高比6.97。电站拟采用中部式地下厂房，最大开挖尺寸为25.4 m×175 m×62.2 m，主厂房上覆岩体厚度约570 m。

1.2　基本地质条件

工程区地处秦岭山区，在大地构造上属于一级构造单元秦岭—祁连褶皱系北部边缘位置，在区域新构造分区上属于秦岭差异隆升区，受新元古代和早古生代秦岭造山带板块俯冲碰撞的影响，工程区形成了以北西西向构造为主的构造格架。工程区呈东北部高、西南区低的低中山地貌，岸坡多基岩出露，主要地层岩性示意图见图1。工程区地层岩性主要包括：1）古元古代秦岭岩群郭庄岩组(Pt_1g^b)，岩性主要为灰色、灰褐色黑云斜长片麻岩，片状—粒状变晶结构，片麻状构造，矿物成分主要为石英、斜长石、碱性长石、黑云母和角闪石，片麻理呈北西西向高倾角发育。2）奥陶系枣园岩组($\eta\gamma\beta O_3$)，岩性主要为浅红色、肉红色二长花岗岩，中粗粒结构，块状构造，主要矿物成分为钾长石、斜长石、石英、黑云母等。3）志留系—奥陶系丹凤岩群(Pz_1D^a)，岩性主要为灰色—青灰色黑云母石英片岩，鳞片粒状变晶结构，片状构造，主要矿物成分为黑云母、石英等。

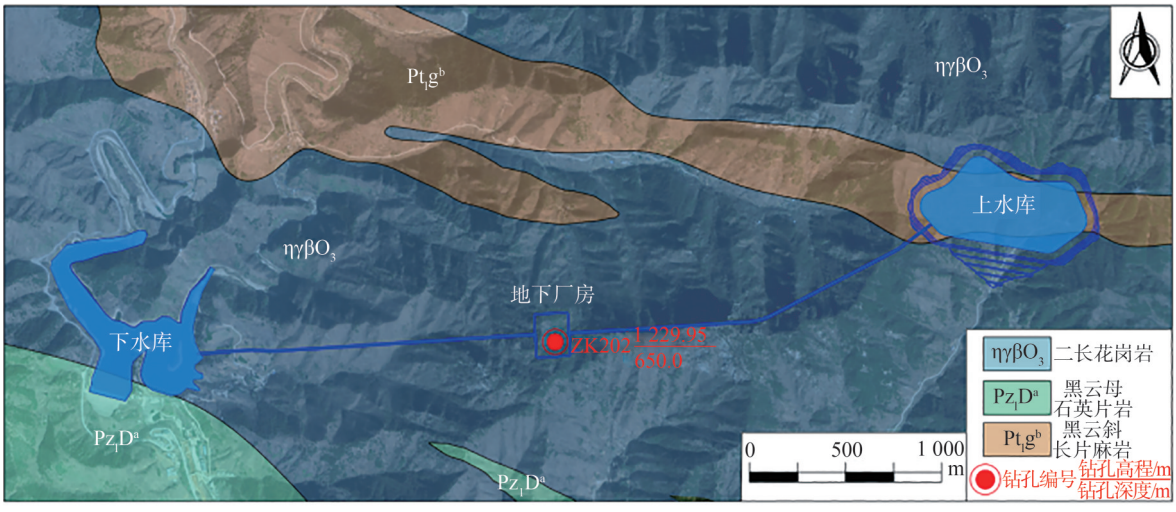


图1　工程区地层岩性示意图

Fig. 1　Stratigraphic lithology diagram of engineering area

2　考虑外水压力折减系数的试验压力

2.1　规范法确定试验压力

规范法对常规压水试验和高压压水试验的试验压力P均采用下式计算：

$$P=P_P+P_z-P_S \tag{1}$$

式中：P_P为地面压力表显示压力，MPa；P_z为附加水压力，等于地面压力表中心至压力计算零线的水柱压

力，MPa；P_S 为管路压力损失，MPa，本文中未考虑该项。

压力计算零线分以下3种情况：1）当地下水位在试段以上时，压力计算零线为地下水位线；2）当地下水位在试段范围内时，压力计算零线为通过地下水位以上试段中点的水平线；3）当地下水位在试段以下时，压力计算零线为通过试段中点的水平线。规范和相关资料中并未对该规定的推导过程做出过多解释，也未说明是否考虑了水压力的折减。本文设计了3种水位情况，如图2所示，并对这3种水位情况分别进行分析。图2中，Δh 为压力表中心到地面的距离，H 为地面到试验段上部的距离，L 为压水试验段长度，h_w 为钻孔稳定水位，P_{w1}、P_{w2}、P_{w3} 为试验段不同深度处的内水压力，P'_{w1}、P'_{w2}、P'_{w3} 为试验段不同深度处的外水压力。

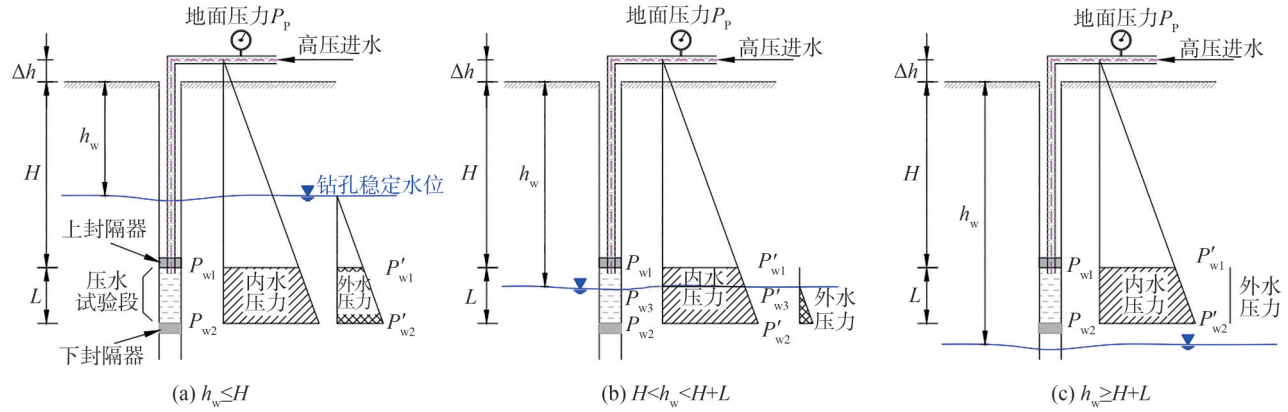


图2 附加水压力计算简图

Fig. 2 Calculation diagrams of additional water pressure

2.1.1 地下水位在试段以上

当地下水位在试段以上，即 $h_w \le H$ 时（图2(a)），压水试验段所受的试验压力除了地面压力 P_P 之外，由钻杆内水压力和外水压力共同作用的水压力即为附加水压力 P_z，其数值为压水试验段内水压力与外水压力之差。假设水的重度为 γ_w，用钻孔稳定水位来计算试验段的水压力，在不考虑水压力折减系数的情况下，试验段上部内水压力 $P_{w1}=\gamma_w(\Delta h+H)$，下部内水压力 $P_{w2}=\gamma_w(\Delta h+H+L)$；试验段上部外水压力 $P'_{w1}=\gamma_w\left(H-h_w\right)$，下部外水压力 $P'_{w2}=\gamma_w\left(H-h_w+L\right)$，试验段受到的附加水压力 P_z 为：

$$P_z=\gamma_w\left(\frac{P_{w1}+P_{w2}}{2}-\frac{P'_{w1}+P'_{w2}}{2}\right)=\gamma_w\left(\Delta h+h_w\right) \quad (2)$$

从式(2)可以看出，P_z 为压力表中心至钻孔稳定水位的水柱压力，即规范法中第1种情况。

2.1.2 地下水位在试段范围内

当地下水位在试段范围内，即 $H<h_w<H+L$ 时（图2(b)），在不考虑水压力折减系数的情况下，P_{w1}、P_{w2} 的计算方法同第2.1.1节，水位位置处内水压力 $P_{w3}=\gamma_w\left(\Delta h+h_w\right)$；$P'_{w1}$ 和 P'_{w3} 均为0，$P'_{w2}=\gamma_w\left(H+L-h_w\right)$，试验段受到的附加水压力 P_z 为：

$$P_z=\gamma_w\left(\frac{P_{w3}-P_{w1}}{2}+P_{w1}\right)=\gamma_w\left(\Delta h+H+\frac{h_w-H}{2}\right) \quad (3)$$

从式(3)可以看出，P_z 为压力表中心至地下水位以上试段部分中点的水柱压力，即规范法中第2种情况。

2.1.3 地下水位在试段以下

当地下水位在试段以下，即 $h_w \ge H+L$ 时（图2(c)），在不考虑外水压力折减系数的情况下，P_{w1}、P_{w2} 的计算方法同第2.1.1节，P'_{w1} 和 P'_{w2} 均为0，试验段受到的附加水压力 P_z 为：

$$P_z=\gamma_w\left(\frac{P_{w1}+P_{w2}}{2}\right)=\gamma_w\left(\Delta h+H+\frac{L}{2}\right) \quad (4)$$

从式(4)可以看出，P_z 为压力表中心至试段中点的水柱压力，即规范法中第3种情况。

2.2 考虑外水压力折减系数的试验压力

根据第2.1节推导过程可以看出，目前有关规范和资料中对计算零线的规定是基于“钻孔水位对试验段的外水压力完全等于其水柱压力”这一假定的，即认为不考虑外水压力折减系数 β_e。然而，目前研究[15]表明，外水压力需要在水柱压力的基础上进行折减计算。规范中这一假定在浅孔中由于水位差较小，误差反馈不明显，但是在深孔中，尤其是在地下水位深度 h_w 与试验段深度 H 较大时，如果仍然不考虑水压力折减系数，试验压力计算值和作用在试验段的实际压力之间的差距就不可忽略。因此，对3种水位情况分别计算考虑外水压力折减系数 β_e 的附加水压力 P_z^e。

2.2.1 地下水位在试段以上

当地下水位在试段以上，即 $h_w \le H$ 时，在考虑 β_e 的情况下，P_{w1}、P_{w2} 的计算方法同第2.1.1节，试验段上部外水压力 $P_{w1}^e=\gamma_w\beta_e\left(H-h_w\right)$，下部外水压力 $P_{w2}^e=\gamma_w\beta_e\left(H-h_w+L\right)$，试验段受到的附加水压力 P_z^e 为：

$$P_z^e=\gamma_w\left(\frac{P_{w1}+P_{w2}}{2}-\frac{P_{w1}^e+P_{w2}^e}{2}\right)$$
$$=\gamma_w\left(\Delta h+(1-\beta_e)H+(h_w-\frac{L}{2})\beta_e+\frac{L}{2}\right)\quad(5)$$

当不考虑外水压力折减，即β_e=1时，$P_z^e=\gamma_w(\Delta h+h_w)$，和规范法中的计算公式相同。一般情况下$0\leq\beta_e<1$，折减系数法的附加水压力应大于不考虑$\beta_e$的附加水压力，相应地，考虑$\beta_e$的试验压力也大于不考虑$\beta_e$的试验压力。

2.2.2　地下水位在试段范围内

当地下水位在试段范围内，即$H<h_w<H+L$时，在考虑β_e的情况下，P_{w1}、P_{w2}、P_{w3}的计算方法同第2.1.2节，P_{w1}^e和水位位置处外水压力P_{w3}^e均为0，$P_{w2}^e=\gamma_w\beta_e(H+L-h_w)$，试验段受到的附加水压力$P_z^e$为：

$$P_z^e=\gamma_w\left(\frac{P_{w1}+P_{w2}}{2}-\frac{P_{w2}^e(H+L-h_w)}{2L}\right)=$$
$$\gamma_w\left[\Delta h+H+\frac{L}{2}-\frac{\beta_e}{2L}\left(H+L-h_w\right)^2\right]\quad(6)$$

当不考虑外水压力折减，即β_e=1时，$P_z^e=\gamma_w(\Delta h+H+L/2)$，和规范法中的计算公式相同。一般情况下$0\leq\beta_e<1$，考虑$\beta_e$的附加水压力大于不考虑$\beta_e$的附加水压力，相应地，考虑$\beta_e$的试验压力也大于不考虑$\beta_e$的试验压力。

2.2.3　地下水位在试段以下

当地下水位在试段以下，即$h_w\geq H+L$时，在考虑水压力折减系数β_e的情况下，P_{w1}、P_{w2}的计算方法同第2.1.3节，P_{w1}^e和P_{w2}^e均为0，试验段受到的附加水压力P_z^e与式(4)相同。该水位下，试验段无外水压力，P_z^e不受外水压力折减系数β_e的影响。

综上所述，当考虑外水压力折减系数β_e时，稳定钻孔水位在试段范围内和试段以上两种情况下，试验段受到的附加水压力P_z^e受β_e影响。一般情况下$0\leq\beta_e<1$时，考虑β_e的附加水压力大于不考虑β_e的附加水压力，且当β_e越大时，P_z^e越小，两者呈负相关。当地下水位在试段以下时，P_z^e不受β_e的影响。

2.3　外水压力折减系数选取

目前，国内针对外水压力折减问题的研究方法主要有折减系数法、数值分析法、实测经验分析法、解析法等，其中折减系数法在工程中最为常用，其取值主要考虑岩体透水性、岩溶发育程度、地下水的渗流状态等要素[20]。范时杰等[21]基于定向钻孔对外水压力进行原位测试，将实测成果与折减系数法计算值进行对比，两者相关性较好。水利水电工程地质勘察规范(GB50487—2022)[22]中给出了外水压力折减系数表(表1)，其取值依据主要为岩体渗透性等级、渗透系数和透水率，该方法在水利水电工程前期勘察阶段能够快速准确地反映外水压力折减系数，应用较为广泛。本文也采用此方法，将通过规范法获取的压水试验透水率进行内插获取外水压力折减系数。

表1　外水压力折减系数[22]

Tab. 1　External water pressure reduction coefficients[22]

岩土体渗透性等级	渗透系数 K/(cm·s^{-1})	透水率 q/Lu	外水压力折减系数β_e
极微透水	$K<10^{-6}$	$q<0.1$	$0\leq\beta_e<0.1$
微透水	$10^{-6}\leq K<10^{-5}$	$0.1\leq q<1$	$0.1\leq\beta_e<0.2$
弱透水	$10^{-5}\leq K<10^{-4}$	$1\leq q<10$	$0.2\leq\beta_e<0.4$
中等透水	$10^{-4}\leq K<10^{-2}$	$10\leq q<100$	$0.4\leq\beta_e<0.8$
强透水	$10^{-2}\leq K<1$	$q\geq100$	$0.8\leq\beta_e\leq1$
极强透水	$K\geq1$		

3　高压压水试验

3.1　试验方法

常规压水试验的试验压力通常分0.3、0.6、1.0 MPa 3级，而高压压水试验的最大压力一般取工程压力的1.2～1.5倍，分为5～10级加载。高压压水试验通常是逐级升高试验压力采集相应流量，即先向试验段施加第1级压力P_1，根据岩体的完整程度选择试验时间，如完整岩体稳压时间一般在5～10 min，岩石完整性越差则稳压时间应适当增长，待流量趋于稳定时结束第1级压力试验，将压力增加至第2级压力P_2，依次进行稳压和升压操作直至最高1级压力P_n。P_n级稳压结束后开始逐级降压至第1级压力P_1，试验过程结束后，根据获取的压力–流量关系可以求得每级压力状态下的岩体透水率。如果升压过程中在某级压力下出现流量突然增大或压力突然下降的情况，此时孔壁岩体发生水力劈裂，孔壁裂隙由闭合状态转变为张开状态，水流状态由层流转变为紊流，此时对应的压力称为岩体的临界压力，也称为水力劈裂压力，它直接反映了试验段岩体承载压力水头作用的能力[23]。由此可见，高压压水试验不仅可以测得裂隙岩体的渗透率，还可以获得岩体裂隙面抵抗水力劈裂破坏的临界压力值。

3.2　钻孔布设与试验方案设计

本工程地下厂房位于上、下水库之间的山脊下方深部岩体内，山脊地面高程约1 230 m，厂房顶拱埋深570 m，厂房底板埋深约630 m，为研究评价地下厂房区域及周边岩体在高压水状态下的渗透特性和临界压力，在地下厂房地表布设了ZK202试验钻孔，深度

为 650 m，孔底深入厂房底板以下 20 m，试验钻孔布设如图 3 所示。根据钻孔勘探揭露，ZK202 岩性为奥陶系枣园岩组（$\eta\gamma\beta O_3$）二长花岗岩，中粗粒结构，块状构造，孔深 0～10.6 m 为强风化岩体，10.6～33.4 m 为弱风化岩体，33.4 m 以下为微风化和新鲜岩体，厂房均位于新鲜岩石内，岩心呈长柱状，钻进过程取心长度一般大于 2 m，平均岩石质量指标（RQD）值为 81.51%，完整性好。通过对厂房部位岩心取样测得单轴饱和抗压强度平均值为 66.8 MPa，属坚硬岩。根据水位观测统计，钻孔稳定水位为 86.0 m。

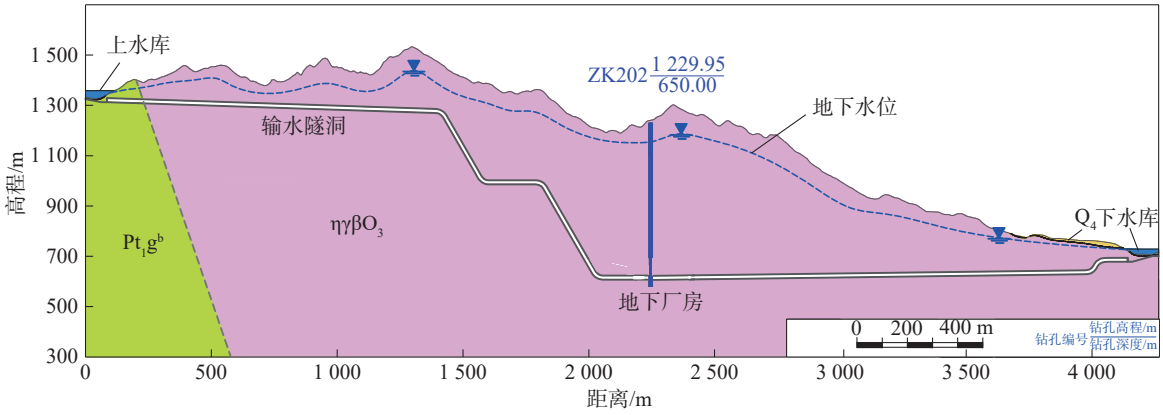
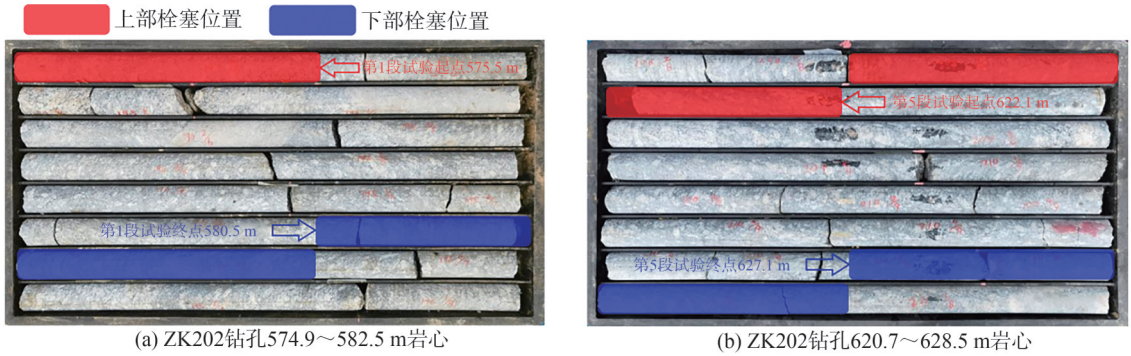


图 3 试验钻孔布置示意图

Fig. 3 Test borehole layout diagram

根据岩心情况与厂房建筑物的位置，共选择了 6 个试验段开展高压压水试验：第 1 段孔深为 575.5～580.5 m；第 2 段孔深为 585.9～590.9 m；第 3 段孔深为 601.2～606.2 m；第 4 段孔深为 615.8～620.8 m；第 5 段孔深为 622.1～627.1 m；第 6 段孔深为 628.1～633.1 m。试验段长度均为 5.0 m，上下端采用双塞法封堵，栓塞长度 1.0 m，试验最大压力取 8.0 MPa，级差 1.0 MPa，由于岩体完整性较好，采用快速法进行试验，稳压时间 5 min。高压水泵额定压力为 12 MPa，最大流量 100 L/min。试验段的典型岩心照片如图 4 所示。



(a) ZK202钻孔574.9～582.5 m岩心　　(b) ZK202钻孔620.7～628.5 m岩心

图 4 试验段典型岩心照片

Fig. 4 Typical core photos of test sections

3.3 试验结果

常规压水试验的压力–流量（P–Q）曲线主要分为层流型、紊流型、扩张型、冲蚀型、充填型，本次高压压水试验的 P–Q 曲线见图 5，显然其并不完全符合常规压水试验的 5 种类型，其原因主要是常规压水试验曲线压力范围较小，不能完全涵盖高压压水试验曲线范围，从而具有局部性。比如图 5 中有 6 段试验曲线，前部直线段包括了常规压水试验的层流型，岩体发生破坏之前的直线段 P–Q 曲线类型可认为是层流型曲线。李钰强[24]在陕西镇安抽水蓄能电站中开展了 4 孔共 68 段高压压水试验，并将其 P–Q 曲线类型归结为开裂型、扩张型和不透水型 3 种，图 5 中的曲线类型和镇安抽水蓄能电站中的“开裂型”曲线基本相同。全海[25]在金沙江某水电站中开展了 3 孔共 42 段高压压水试验，其中出现的“劈裂型”曲线也与本次试验曲线基本相同。刘录君等[9]在黑龙江荒沟抽蓄电站中测得 RQD 为 87% 的较完整花岗岩的高压压水试验 P–Q 曲线也与本次试验曲线接近。由此可见，常规压水试验的 5 种曲线类型并不完全适用于高压压水试验，可以将本次高压压水试验的破坏类型定义为“前段层流型、后段开裂型”的综合型曲线，该类型曲线在完整、较完整花岗岩地区较为典型。

高压压水试验结果见表 2，第 1 段试验压力（本节所述压力均为地表压力传感器的测量压力）由 1.0 MPa 逐级增加到 6.0 MPa 的过程中，流量由 6.28 L/min 增加至 7.46 L/min，当压力增加至 6.96 MPa

时，流量骤增至98.6 L/min，岩体发生劈裂破坏；第2段压力由1.0 MPa逐级增加到5.0 MPa的过程中，流量由6.49 L/min增加至7.53 L/min，当压力增加至5.65 MPa时，流量骤增至97.0 L/min；第3段压力由1.0 MPa逐级增加到4.0 MPa的过程中，流量由6.49 L/min增加至7.08 L/min，当压力增加至4.67 MPa时，流量骤增至96.7 L/min；第4段压力由1.0 MPa逐级增加到5.0 MPa的过程中，流量由6.58 L/min增加至7.76 L/min，当压力增加至5.56 MPa时，流量骤增至96.7 L/min；第5段压力由1.0 MPa逐级增加到5.0 MPa的过程中，流量由6.47 L/min增加至7.85 L/min，当压力增加至6.04 MPa时，流量骤增至95.0 L/min；第6段压力由1.0 MPa逐级增加到5.0 MPa的过程中，流量由6.24 L/min增加至6.93 L/min，当压力增加至5.91 MPa时，流量骤增至95.6 L/min。可以看出6个试验段的渗透特性、临界压力和破坏模式均比较类似，也从侧面反映了厂房段岩体渗透特性的均一性。

现场实测压力–流量–时间（*P–Q–t*）曲线如图6所示，根据试验曲线可以将试验过程分为两个阶段。第1阶段为图中垂直虚线左侧，试验压力逐级增加而流量却未明显增大，此时孔壁岩体裂隙多呈胶结闭合状态，局部细微裂隙在水压作用下以层流状态渗流，渗流量较小。第2阶段为图中垂直虚线右部，当试验水压达到临界压力P_a时，孔内的原有力学平衡被打破，试验压力大于裂隙的抗张拉力、外水压力和地应力对裂隙的围护压

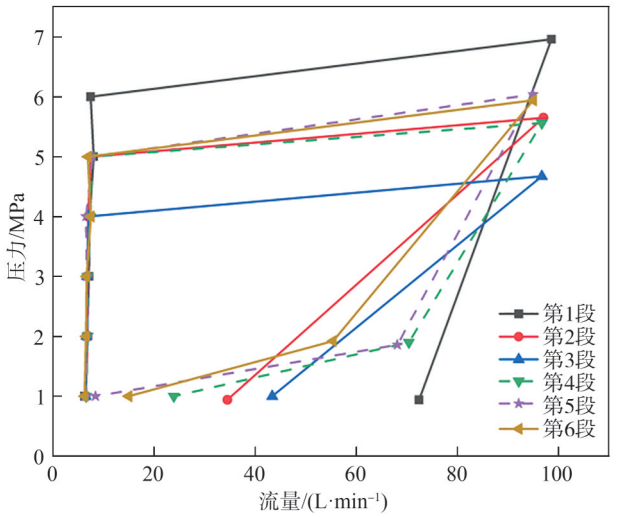


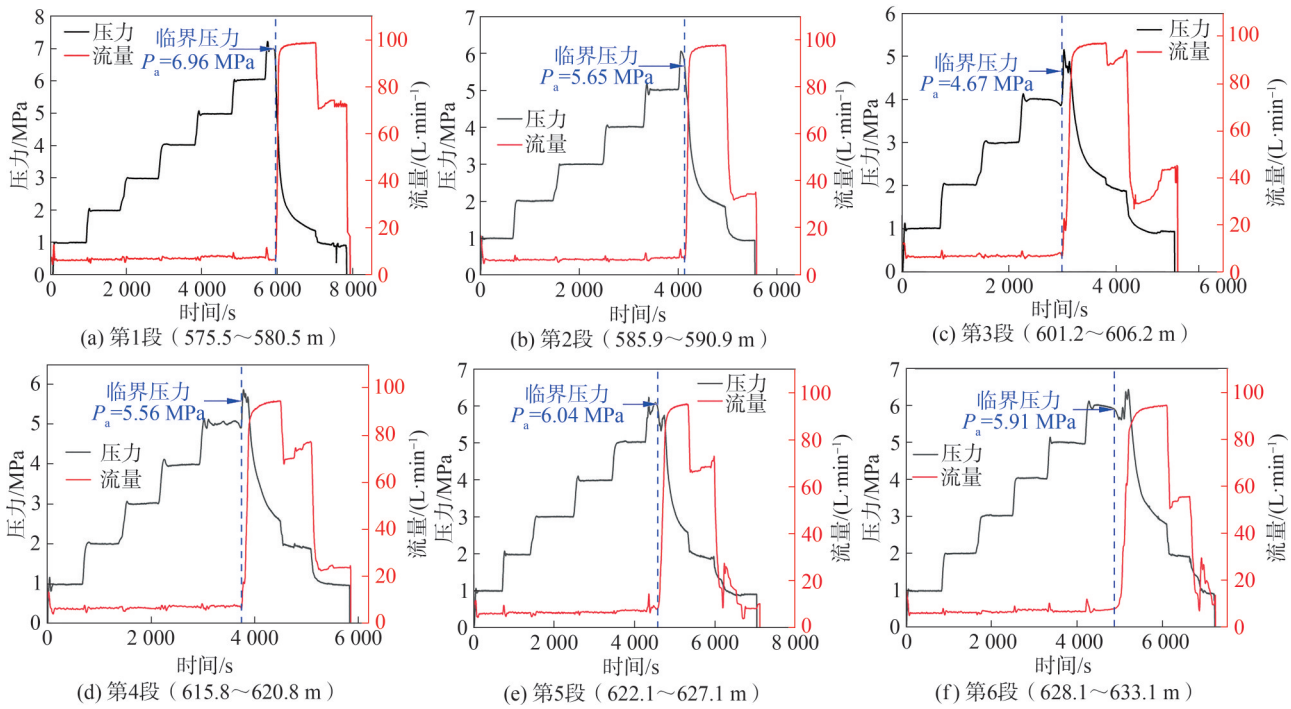
图5　试验段*P–Q*曲线

Fig. 5　*P–Q* curves of test sections

表2　各试验段高压压水试验结果

Tab. 2　High-pressure water injection test results for each test section

试验编号	深度/m	临界压力/MPa	临界流量/(L·min⁻¹)	*P–Q*曲线类型
第1段	575.5～580.5	6.96	7.46	
第2段	585.9～590.9	5.65	7.53	
第3段	601.2～606.2	4.67	7.08	“层流型+开裂型”综合型曲线
第4段	615.8～620.8	5.56	7.76	
第5段	622.1～627.1	6.04	7.85	
第6段	628.1～633.1	5.91	6.93	



(a) 第1段（575.5～580.5 m）　(b) 第2段（585.9～590.9 m）　(c) 第3段（601.2～606.2 m）

(d) 第4段（615.8～620.8 m）　(e) 第5段（622.1～627.1 m）　(f) 第6段（628.1～633.1 m）

图6　试验段*P–Q–t*曲线

Fig. 6　*P–Q–t* curves of test sections

力的合力，外部表现为裂隙迅速扩张并形成一定宽度和长度的贯通裂缝，此时长大裂缝的渗水量远大于高压水泵的供水量，导致试验段迅速失压，在曲线形式上表现为压力曲线的脆性破坏式下降和流量曲线的急剧拉升，在宏观渗透特性上表现为岩体渗透性剧增，直至压力下降至一定程度后，孔内新的力学平衡形成，裂隙基本闭合，但其渗透性较破坏之前大大增加。图6中竖向虚线为临界压力界限，其与压力曲线的交点即为临界压力P_a。

4 试验参数分析研究

4.1 外水压力折减系数对透水率的影响

4.1.1 常规压水试验透水率

在高压压水试验之前对全孔开展了常规压水试验，根据规范法计算了常规压水试验岩体透水率，并绘制了钻孔深度–透水率关系曲线，如图7所示。根据常规压水试验结果，岩体透水率为0.03～3.85 Lu，平均透水率为0.20 Lu，透水率总体以微透水性和极微透水性为主，在局部裂隙密集段为弱透水性。根据表1，通过平均透水率内插求得β_e=0.11。

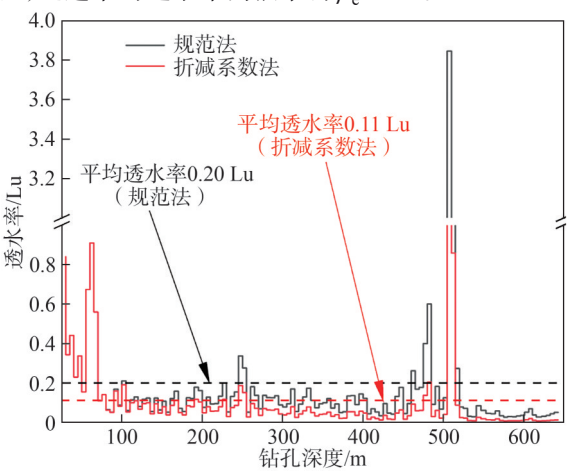


图7 钻孔常规压水试验透水率计算结果

Fig. 7 Calculation results of water permeability in conventional water injection tests

在考虑β_e的情况下，计算所得透水率为0.01～1.26 Lu，平均透水率为0.11 Lu，透水率值较规范法下降3.7%～72.8%，平均下降44.1%，且钻孔深度越大，变化幅度越大，在厂房段（深度570～630 m）透水率平均值较规范法减小71.1%，如图8所示。

4.1.2 高压压水试验透水率

对高压压水试验段透水率分别采用两种方法进行计算，结果如表3所示。由表3可知，规范法计算的透水率为0.19～0.26 Lu，折减系数法计算的透水率为0.12～0.14 Lu，相较前者下降35.9%～45.5%。综上所述，在计算压水试验透水率成果时，外水压力折减系数对透水率的影响不可忽视，尤其是深孔和水位在试验段以上距离较大的情况，折减系数法求得的透水率更加合理且量值也更小，可以在保证围岩渗透稳定的前提下优化设计方案。

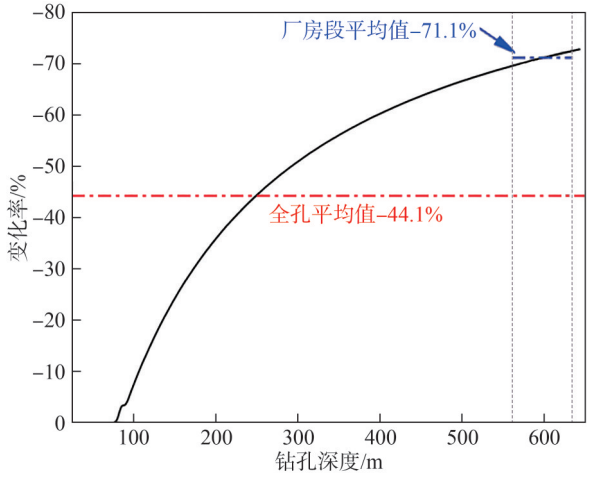


图8 两种计算方法透水率变化率

Fig. 8 Rate of change of water permeability by different methods

表3 各试验段高压压水透水率计算结果

Tab. 3 Calculation results of high-pressure water permeability in each test section

试验编号	试验深度/m	流量/(L·min^{-1})	透水率/Lu		变化率/%
			规范法	折减系数法	
第1段	575.5～580.5	7.46	0.191	0.122	–35.9
第2段	585.9～590.9	7.53	0.231	0.137	–40.7
第3段	601.2～606.2	7.08	0.256	0.140	–45.5
第4段	615.8～620.8	7.76	0.242	0.139	–42.5
第5段	622.1～627.1	7.85	0.228	0.134	–41.0
第6段	628.1～633.1	6.93	0.205	0.119	–41.7

4.2 常规压水试验与高压压水试验成果对比

鉴于考虑外水压力折减系数的岩体透水率更接近岩体实际情况，本文将折减系数法计算的常规压水试验透水率和高压压水试验透水率进行对比，见表4。常规压水试验岩体透水率范围为0.008～0.011 Lu，平均值为0.010 Lu；高压压水试验岩体透水率范围为0.119～0.140 Lu，平均值为0.132 Lu。岩体在常规压力下呈微透水至极微透水状态，在高压压力下呈微透水状态，高压压水与常规压水透水率比值为12.0～16.9，由此可见两种试验压力下岩体透水率差别较大，在该工程完整、较完整的岩石条件下，高压压水试验透水率远大于常规压水试验透水率。

根据前人试验研究和理论分析，高压压水试验透水率一般是高于常规压水试验的，这与本次试验成果相吻合，其主要原因是岩体内的原生裂隙随着压力的

表4　常规压水试验与高压压水试验结果对比

Tab. 4　Comparison of results of conventional and high-pressure water injection tests

试验编号	试验深度/m	常规压水试验透水率/Lu	高压压水试验透水率/Lu	比值
第1段	575.5～580.5	0.010	0.122	12.0
第2段	585.9～590.9	0.009	0.137	15.1
第3段	601.2～606.2	0.011	0.140	13.2
第4段	615.8～620.8	0.011	0.139	12.7
第5段	622.1～627.1	0.008	0.134	16.9
第6段	628.1～633.1	0.009	0.119	13.4

增加而趋于张开，特别是岩体发生水力劈裂后，渗透性会明显增加[26–27]。例如田作印等[28]在蒲石河抽水蓄能电站中对较完整花岗岩的两种试验方法成果进行对比，结果表明，高压压水透水率与常规压水透水率比值为11.05～11.46，与本文结果接近；王化龙等[29]在海南琼中抽水蓄能电站中对花岗岩地区两种试验方法成果进行对比，结果表明，高压压水试验条件下的渗透系数均大于常规压水试验，两种试验下的岩体渗透系数比值约为2～50，离散性较本文结果偏大，推测其原因是试验段岩石的完整性差异大，而本次试验段均为完整和较完整的花岗岩，完整性差异小，故透水率离散性较小。

4.3　外水压力折减系数对劈裂压力的影响

在水工隧洞围岩衬砌型式设计中除了考虑挪威准则、最小地应力准则外，还需要防止围岩发生水力劈裂现象，即“渗透准则”[30–31]，该准则需要保证隧洞内水压力小于岩体的劈裂压力，从而保证围岩不会发生水力击穿现象，因此劈裂压力的准确取值对确定围岩衬砌型式十分重要。本文用规范法和折减系数法分别计算其劈裂压力，结果见表5，规范法计算的劈裂压力为5.53～7.82 MPa，平均值为6.66 MPa；折减系数法计算的劈裂压力为10.14～12.20 MPa，平均值为11.30 MPa。后者相对前者劈裂压力提高56.0%～83.3%，平均值提高约70%。由此可见，在计算劈裂压力时，外水压力折减系数的影响不可忽略，尤其是对于水位与试验段距离较大的深孔，折减系数法求得的劈裂压力值远大于规范法。根据以上分析，折减系数法能更好地发挥岩体的抗劈裂潜力。

表5　各试验段劈裂压力计算结果

Tab. 5　Calculation results of splitting pressure of each test section

试验编号	试验深度/m	地面劈裂压力/MPa	附加水压力/MPa		劈裂压力/MPa		变化率/%
			规范法	折减系数法	规范法	折减系数法	
第1段	575.5～580.5	6.96	0.86	5.24	7.82	12.20	56.0
第2段	585.9～590.9	5.65	0.86	5.33	6.51	10.98	68.7
第3段	601.2～606.2	4.67	0.86	5.47	5.53	10.14	83.3
第4段	615.8～620.8	5.56	0.86	5.60	6.42	11.16	73.8
第5段	622.1～627.1	6.04	0.86	5.65	6.90	11.69	69.5
第6段	628.1～633.1	5.91	0.86	5.71	6.77	11.62	71.6

5　结　论

本文验证了规范法对高压压水试验压力计算零线的规定是基于不考虑水压力折减系数假设的，并提出了考虑外水压力折减系数的计算方法，将两种方法应用到实际工程中进行对比，结论如下：

1）钻孔水位在试段以上或试段范围内时，附加水压力受外水压力折减系数影响，考虑外水压力折减系数的附加水压力一般大于规范中规定的附加水压力，且当外水压力折减系数越大时，附加水压力越小，两者呈负相关。地下水位在试段以下时，附加水压力不受外水压力折减系数的影响。

2）在完整、较完整花岗岩地层中，高压压水试验的P–Q曲线破坏类型为“前段层流型、后段开裂型”的综合型曲线。用规范法计算的高压压水试验透水率为0.19～0.26 Lu，用折减系数法计算的高压压水试验透水率为0.12～0.14 Lu，相对前者下降35.9%～45.5%。

3）折减系数法计算的高压压水试验透水率远大于常规压水试验透水率，前者与后者的比值为12.0～16.9倍。

4）规范法计算的劈裂压力范围为5.53～7.82 MPa，折减系数法计算的劈裂压力范围为10.14～12.20 MPa，折减系数法求得的劈裂压力值远大于规范法。

5）本文在完整、较完整的花岗岩地层开展试验，验证了外水压力折减系数对高压压水试验的影响不可忽略，在其他地层中同样如此。建议在抽水蓄能电站深孔高压压水试验中充分考虑外水压力折减系数对试验参数的影响，并综合比较规范法和折减系数法对工程设计的影响，更加科学地平衡设计安全性和工程造价，从而进一步提高抽水蓄能电站勘测设计质量。

参考文献：

[1] Tan Xiandong, Liu Jun, Xu Zhicheng, et al. Power supply and demand balance during the 14th Five-Year Plan period under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J].Electric Power,2021,54(5):1–6.[谭显东,刘俊,徐志成,等.“双碳”目标下“十四五”电力供需形势[J].中国电力,2021,54(5):1–6.]

[2] Zhang Boting. Vigorously developing pumped storage is an urgent matter to realize China's dual carbon goal[J].Hydropower and Pumped Storage,2021,7(6):1–3.[张博庭.大力发展抽水蓄能是实现我国“双碳”目标的当务之急[J].水电与抽水蓄能,2021,7(6):1–3.]

[3] Bai Rui,Han Dong,Jin Wei,et al.Analysis on key issues in construction and operation of hybrid pumped storage power stations[J].Yangtze River,2024,55(11):46–56.[柏睿,韩冬,金伟,等.混合式抽水蓄能电站建设运行关键问题研究[J].人民长江,2024,55(11):46–56.]

[4] Bai Zhenglin, Huang Yunlong, Xie Wentao. Analysis on hydraulic fracturing mechanism of surrounding rock in high pressure bifurcated pipe area of a pumped storage power station[J]. Site Investigation Science and Technology, 2022(2): 38–42.[柏正林,黄运龙,谢文涛.某抽水蓄能电站高压岔管区围岩水力劈裂机理分析[J].勘察科学技术,2022(2): 38–42.]

[5] Zhang Xinmin,Jiang Zhongming,Feng Shurong,et al.Study on the determination of permeability coefficient of fractured rock mass under high pressure test condition[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2011,30(1):155–159. [张新敏,蒋中明,冯树荣,等.岩体高压压水试验的渗透系数取值方法探讨[J].水力发电学报,2011,30(1):155–159.]

[6] Wang Jinguo, Han Zhiying, Cheng Wei, et al. Inversion of permeability in high pressure packer test under hydromechanical coupling of dual media[J].Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(8): 113–119.[王锦国,韩智颖,程伟,等.基于双重介质渗流-应力耦合模型的高压压水试验渗透参数反演[J].长江科学院院报,2024,41(8):113–119.]

[7] 国家能源局.水工隧洞设计规范:NB/T 10391—2020[S].北京:中国水利水电出版社,2021.

[8] Wang Bin, Dong Zhihong, Liu Yuankun, et al. Stability analysis of high pressure tunnel of Guiyang Pumped Storage Power Station in Hunan Province[J].Express Water Resources & Hydropower Information,2024,45(3):47–53. [王斌,董志宏,刘元坤,等.湖南省桂阳抽水蓄能电站高压引水隧洞稳定性分析[J].水利水电快报,2024,45(3):47–53.]

[9] Liu Lujun,Ji Cong.Method discussion and result analysis of high pressure water pressure test for tunnel branch pipe[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2016, 34(2):41–44.[刘录君,季聪.隧洞岔管高压压水试验及成果分析[J].东北水利水电,2016,34(2):41–44.]

[10] Han Guoqiang, Bai Yunzhe, Ke Xiong. Application of high pressure water pressure test in a pumped storage power station project[J].Electric Power Survey & Design,2023(S2): 193–197.[韩国强,白云哲,柯雄.高压压水试验在某抽水蓄能电站工程中的应用[J].电力勘测设计,2023(S2): 193–197.]

[11] Chen Wanlin. Application of high pressure water pressure test in Ganxian pumped storage power station[J].Low Carbon World,2016,6(29):95–96.[陈万林.高压压水试验在赣县抽水蓄能电站中的应用[J].低碳世界,2016,6(29): 95–96.]

[12] 国家能源局.水电工程钻孔压水试验规程:NB/T 35113—2018[S].北京:中国电力出版社,2018.

[13]《工程地质手册》编委会.工程地质手册[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2018:1240–1242.

[14] Wang Xin. Study on the reduction coefficient method of assessing the tunnel external water pressure[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology,2019.[王欣.隧道外水压力评估的折减系数法研究[D].成都:成都理工大学,2019.]

[15] Huang Wei,Sun Yun,Zhang Jianping,et al.Research review on high external water pressure of deep-buried tunnels[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2023,45(5):1–11.[黄威,孙云,张建平,等.深埋隧洞高外水压力研究进展[J].三峡大学学报(自然科学版),2023,45(5):1–11.]

[16] Zhu Caihui,Yang Qiqiang,Li Yubo,et al.Influencing factors of external water pressure reduction coefficient on lining in water-rich loess tunnel[J].Geotechnical Engineering Technique,2023,37(6):656–663.[朱才辉,杨奇强,李玉波,等.富水黄土隧洞衬砌外水压力折减系数影响因素研究[J].岩土工程技术,2023,37(6):656–663.]

[17] Zhu Caihui, Yin Li, Yang Qiqiang, et al. A study on reduction coefficient of external hydraulic pressure at the lining of diversion tunnel in saturated Q2 Loess stratum[J].Modern Tunnelling Technology,2023,60(2):94–102.[朱才辉,尹力,杨奇强,等.饱和Q2黄土地层引水隧洞衬砌外水压力折减系数研究[J].现代隧道技术,2023,60(2):94–102.]

[18] Qi Haitang, Ren Xuhua, Zhang Jixun. Analytical calculation method of external water pressure of tunnel based on well flow theory[J].Water Power,2023,49(4):29–35.[戚海棠,任旭华,张继勋.基于井流理论的隧洞外水压力解析计算方法研究[J].水力发电,2023,49(4):29–35.]

[19] Liu Yanwen,Tian Wei,Guo Jian.Research on reduction coefficients of water pressure on outer surfaces of linings of inclined shaft tunnels in deep embedment[J]. Industrial

Construction,2024,54(5):184–191.[刘彦文,田威,郭健.深埋斜井隧道衬砌外水压力折减系数研究[J].工业建筑,2024,54(5):184–191.]

[20] Wang Dan,Qi Haitang,Ren Xuhua,et al.Research on analytical calculation method of external water pressure under different seepage control measures in deeply buried tunnels in water-rich areas[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences),2023,45(5):25–30.[王丹,戚海棠,任旭华,等.富水区深埋隧洞不同渗控措施下的外水压力解析计算方法研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2023,45(5):25–30.]

[21] Fan Shijie, Wang Zizhong, Li Long, et al. In-situ testing technology and its application for external WaterPressure in deep-buried tunnels based on directional drilling[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025,42(8):217–222.[范时杰,王子忠,李珑,等.基于定向钻孔的深埋隧洞外水压力原位测试技术及应用[J].长江科学院院报,2025,42(8):217–222.]

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.水利水电工程地质勘察规范(2022年版):GB 50487—2008[S].北京:中国计划出版社,2022.

[23] Yao Yang,Lou Guochuan,Wei Bin,et al.Analysis and treatment of hydraulic fracturing in lower horizontal section of penstock in CCS hydropower station[J].Yellow River, 2020,42(12):106–110.[姚阳,娄国川,魏斌,等.CCS水电站压力管道下平段水力劈裂分析及处理[J].人民黄河,2020,42(12):106–110.]

[24] Li Yuqiang. Application of high water-pressure test in the pumped storage[J]. Resources Environment & Engineering,2014,28(4):528–530.[李钰强.高压压水试验在抽水蓄能电站勘察中的应用[J].资源环境与工程,2014,28(4):528–530.]

[25] Quan Hai. Determination of impervious curtain depth in high arch dam project based on high pressure water pressure test[J].Low Carbon World,2017,7(31):98–100.[全海.基于高压压水试验确定高拱坝工程中防渗帷幕深度[J].低碳世界,2017,7(31):98–100.]

[26] Li Shuangshuang, Huang Yong, Zhou Zhifang. Discussion on the value of permeability coefficient of single horizontal fissure under the condition of high pressure water[J]. Water Power,2021,47(11):26–30.[李双双,黄勇,周志芳.高压水条件下的水平单裂隙渗透系数取值探讨[J].水力发电,2021,47(11):26–30.]

[27] Huang Yong,Zhou Lintong,Zhou Zhifang.Equations for permeability variation of fractured rock mass under high water pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1433–1438.[黄勇,周麟桐,周志芳.高水压力作用下裂隙岩体渗透性的变化研究[J].工程地质学报,2018,26(6):1433–1438.]

[28] Tian Zuoyin, Yang Zongling. Discussion on engineering significance of high pressure water pressure test[J]. Resources Environment & Engineering, 2008, 22(S1): 211–214.[田作印,杨宗玲.浅谈高压压水试验工程意义[J].资源环境与工程,2008,22(S1):211–214.]

[29] Wang Hualong, Li Chong. The study on the results of the borehole routine water pressure test and the high pressure water pressure test[J].Yunnan Water Power,2014,30(6):11–15.[王化龙,李冲.钻孔常规压水和高压压水试验成果研究[J].云南水力发电,2014,30(6):11–15.]

[30] Su Kai,Zhou Xin,Hao Jungang,et al.Design theory and application progress of high-pressure reinforced concrete bifurcation pipes[J/OL]. Advanced Engineering Sciences, 2024:1–15[2025–06–08].https://jsuese.scu.edu.cn/thesisDetails#10.12454/j.jsuese.202400596.[苏凯,周鑫,郝军刚,等.高压钢筋混凝土岔管设计理论与应用进展[J/OL].工程科学与技术,2024:1–15[2025–06–08].https://jsuese.scu.edu.cn/thesisDetails#10.12454/j.jsuese.202400596.]

[31] Li Hongxing, Bai Wei, Wu Xiaohua, et al. Analysis and evaluation of high pressure tunnel lining types in Shitai Pumped Storage Power Station in Anhui Province[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2024, 45(1):39–43.[李红星,白伟,吴晓华,等.安徽省石台抽水蓄能电站高压隧洞衬砌型式分析与评价[J].水利水电快报,2024,45(1):39–43.]

Effects of External Water Pressure Reduction Coefficient on Parameters for High-pressure Water Injection Test in Deep Boreholes of Pumped Storage Power Stations

YANG Wenchao, *FAN Xinyu*, *REN Chao*, *SONG Minggang*, *CHEN Guojiang*

(POWERCHINA Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710100, China)

Abstract:

Objective The accuracy of high-pressure water injection test parameters in deep boreholes is crucial for the construction of pumped storage power stations. Currently, conventional computing methods for water injection test parameters are still used for high-pressure scenarios, leading to significant errors in deep borehole applications. This paper optimizes the calculation of additional hydraulic pressure by introducing an external water pressure reduction coefficient, thereby enhancing the reliability of deep borehole high-pressure water injection test parameters and providing more reliable guidance for engineering design.

Methods Firstly, the calculation method stipulated in the current specifications is analyzed. By examining three groundwater level scenarios: above the test section, within the test section, and below the test section, it is identified that the additional hydraulic pressure calculation is based on the assumption that "the external water pressure exerted by the borehole water on the test section equals its full hydrostatic pressure." This overestimated external water pressure is the primary cause of parameter errors in deep-borehole high-pressure water injection tests. For optimization, an external water pressure reduction coefficient is introduced to recalibrate the additional hydraulic pressure calculation under all three groundwater conditions. This adjustment brings the external water pressure closer to actual field conditions and yields more rational computational parameters. Finally, the method is validated through a case study at a pumped storage power station. The reduction coefficient is derived by interpolating permeability rates from water injection tests in deep boreholes. The revised approach calculates key parameters, including permeability rate and splitting pressure under high-pressure water injection test conditions, and demonstrates significant improvements compared to standard calculation results.

Results and Discussions The current specification for the pressure calculation baseline in high-pressure water injection tests is based on the assumption that the external water pressure reduction coefficient is not considered, which may lead to non-negligible errors in deep borehole parameter calculations. According to the revised additional hydraulic pressure calculation formula incorporating the external water pressure reduction coefficient, when the borehole water level is above or within the test section, additional hydraulic pressure is influenced by the external water pressure reduction coefficient. Generally, additional hydraulic pressure calculated with the external water pressure reduction coefficient is greater than that specified in current standards, and shows a negative correlation with the external water pressure reduction coefficient. When the groundwater level is below the test section, additional hydraulic pressure remains unaffected by the external water pressure reduction coefficient. The calculation formula is applied to the deep hole of a pumped storage power station in Shaanxi province and compared with the standard method. The results show that: In intact to moderately intact granite formations, the failure pattern of the pressure–flow (P–Q) curve in high-pressure water injection tests deviates from the conventional five-type classification. Instead, it exhibits a composite characteristic of "laminar flow in the initial phase and cracking behavior in the later phase". The pressure–flow–time (P–Q–t) curve demonstrates distinct stages demarcated by the splitting pressure: during the first stage, incremental pressure increases yield no significant flow rate growth, while the second stage features a brittle-failure pressure drop accompanied by a sharp flow surge. Permeability rates calculated via the standard method for conventional water injection tests range 0.03～3.85 Lu (average: 0.20 Lu). In contrast, the reduction coefficient method yields 0.01～1.26 Lu (average: 0.11 Lu), representing reductions of 3.7%～72.8% (average: 44.1%) compared to the standard method. The reduction magnitude increases with borehole depth, notably reaching 71.1% for average permeability in powerhouse sections. The water permeability of the high-pressure water injection test is 0.19～0.26 Lu by the standard method, and 0.12～0.14 Lu by the reducing coefficient method, which is 36.0%～41.8% lower than the former. The ratio of the high-pressure water injection test to the conventional water injection test is 12.0 to 16.9 times, the water permeability of the high-pressure water injection test is much higher than that of the conventional one. The splitting pressure calculated by the standard method ranges from 5.52 to 7.81 MPa, and the splitting pressure calculated by the reduction coefficient method ranges from 10.14 to 12.20 MPa. The value of the splitting pressure obtained by the reduction coefficient method is much higher than that by the standard method. This study experimentally validates the impact of the external water pressure reduction coefficient on high-pressure water injection tests in intact to moderately intact granite formations, however, this method is also feasible in other diverse geological strata.

Conclusions Compared to the standard method, the modified reduction coefficient approach enables more accurate characterization of rock mass permeability and fracturing pressure, thereby effectively mobilizing the rock's anti-seepage potential. This methodology provides critical guidance for optimizing designs and reducing project costs. The construction of pumped storage power stations is experiencing rapid expansion, accompanied by a prevailing trend of increasingly deeper boreholes, the accuracy of high-pressure water injection test parameters obtained from deep boreholes holds critical significance for pumped storage projects. It is strongly advised that external water pressure reduction coefficients be fully incorporated into high-pressure water injection test calculations for pumped storage power stations. By comparatively analyzing the impacts of both current code methods and the reduction coefficient method on engineering design, a more scientific balance between design safety and construction costs can be achieved, ultimately enhancing the quality of survey and design works for pumped storage power stations.

Key words: pumped storage power station; high-pressure water injection test; external water pressure reduction coefficient; splitting pressure; water permeability rate

（编辑　陈　雪）

引用格式: Yang Wenchao,Fan Xinyu,Ren Chao,et al.Effects of external water pressure reduction coefficient on parameters for high-pressure water injection test in deep boreholes of pumped storage power stations[J]. Advanced Engineering Sciences,2026,58(1):90–100.[杨文超,范新宇,任超,等.外水压力折减系数对抽蓄电站深孔高压压水试验参数的影响研究[J].工程科学与技术,2026,58(1):90–100.]