

高压岔管区断层带岩体的水力劈裂研究

刘泽俊¹, 庄现振², 钱程³, 耿海峰⁴, 刘明⁵

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 徐州邳州市水建总公司, 江苏 徐州 221300;
3. 江苏淮阴水利建设有限公司, 江苏 淮安 223005; 4. 江苏省徐州市水务局, 江苏 徐州 221000;
5. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 深埋隧洞围岩在高压水压力作用下可能会发生水力劈裂, 尤其是断层及其影响带岩体。某抽水蓄能电站高压岔管区断层及影响带岩体灌浆前后的试验结果表明, 灌浆后岩体的水力劈裂压力明显增加, 但仍有 17% 试段岩体的水力劈裂压力值小于或等于引水道内的静水压力。充水试验结果表明岩体没有发生水力劈裂, 其原因可能有三个: 一是不能依据压力增加的绝对值来判断岩体是否发生劈裂, 应根据压力增加的相对大小来判断; 二是尽管水道内的水压力很高, 但水道内的水流通过钢筋混凝土渗漏到围岩灌浆圈时, 会损失一部分水头, 实际的水压力比水道内的静水压力要低; 三是与岩体的二次劈裂压力有关。

关键词: 断层带; 水力劈裂; 高压压水试验; 水压力

中图分类号: TV 139.14; P641.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0059-04

Research on Hydraulic Fracture of Rock Mass in the Fault Zone of High-pressure Branch Pipe

LIU Ze jun¹, ZHU ANG Xian zhen², QIAN Cheng³, GENG Hai feng⁴, LIU Ming⁵

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaiyan 223001, China;
2. Water Construction Company in Pizhou Xuzhou, Xuzhou 221300, China;
3. Jiangsu Huaiyin Construction of Hydroproject Limited Company, Huaiyan 223005, China;
4. Jiangsu Province Xuzhou Municipal Water Affairs Bureau, Xuzhou 221000, China;
5. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Hydraulic fracture may occur in the surrounding rock of deep buried tunnel under high water pressure, especially in the fault and its influencing zones. The results of high water pressure test before and after the grouting in the fault and its influencing zones of a pumped storage power station showed that the pressure of hydraulic fracture increases obviously after the grouting, but the hydraulic fracture pressure value of about 17% of test section rock mass is less than or equal to the hydrostatic pressure in the diversion penstock. However, the results of water filling test indicated that there is no hydraulic fracture in the fault and its influencing zones, which may be due to that: (1) the absolute values of increased pressure may not be appropriate to determine the occurrence of hydraulic fracture, and the relative values of increased pressure should be used; (2) although the water pressure is high in the pipe, there is head loss when water leaks from reinforced concrete into wall rock grouting zone, resulting in lower water pressure than the hydrostatic pressure in the pipe; and (3) the secondary hydraulic fracture of rock mass.

Key words: fault zones; hydraulic fracture; high water pressure test; water pressure

目前,我国水利水电工程建设的规模越来越大,特别是一些抽水蓄能电站,水头差较大,有的甚至超过 600 m(如广州蓄能水电站),其深埋隧洞(输水系统)将承受较大的内水和外水压力,隧洞围岩可能发生水力劈裂^[1]。目前,岩体力学劈裂的研究主要集中在试验和理论推导等方面:詹美礼等^[2]针对厚壁圆筒试件进行 9 组近 30 个试样的水力劈裂试

验研究,提出水力劈裂问题中渗透力作用机制,给出了发生水力劈裂破坏的半经验理论判别关系。王国庆等^[3]采用高压渗流-应力耦合试验仪对以水泥砂浆作为岩石相似材料的厚壁圆筒试件进行水力劈裂试验,研究了试件破坏的形式和发生水力劈裂破坏的条件,探讨了试件在不同压力环境下水力劈裂破坏的机理。针对高水头作用下水工压力隧洞的水

力劈裂研究工作和设计理论的不足,根据断裂力学原理对高水头作用下水工压力隧洞的水力劈裂作用进行了研究,并推导了水力劈裂作用发生的临界水头压力值^[45]。

本研究根据某抽水蓄能电站岔管区主要断层 F15 及其影响带岩体的水力劈裂试验和水道充水试验,分析断层及其影响带岩体对水道内高水压力的响应。

1 断层结构特性

某抽水蓄能电站引水高压岔管区洞室埋深 210 m 左右,上覆弱风化—新鲜岩体,厚度大于 195 m,地层岩性简单,洞室围岩以微风化—新鲜二长花岗岩为主,局部分布花岗岩伟晶岩脉,围岩岩石较坚硬。引水高压岔管区地质构造较复杂,不仅分布有规模相对较大的 F15 断层,而且小型裂隙性断层及节理裂隙较发育。高压岔管区断裂构造以陡倾角为主,局部分布缓倾角结构面,断裂构造发育方向以 NNE、NE、NW、NNW 向为主,其中 NNE、NE 向构造主要以断层、裂隙性断层出现(如 F15 断层),规模相对较大。

F15 断层出露于¹、²引水隧洞下平段,为一压扭性断层(图 1)。该断层与引水隧洞洞轴线大角度相交,沿断层带引水隧洞洞壁间最小间距为 41.2 m。该断层紧邻引水高压岔管,沿洞轴线距¹引水高压岔管分岔点距离为 14 m,距²引水高压岔管分岔点仅 4 m 左右。洞室内 F15 断层包括 2 条分支断层,两分支断层在¹引水隧洞下平段左侧合并,分支断层间最大相距 5 m 左右。东侧分支断层产状 N30°—38°E,SE∠80°,破碎带宽度 0.6~1.5 m;西侧分支断层产状 N32°—35°E,SE∠80°~88°,破碎带宽度 0.2~1.0 m。两分支断层之间,¹引水隧洞洞室两壁及²引水隧洞洞室北侧壁岩体破碎,结构面较发育,且沿结构面见有蚀变现象,²引水隧洞南侧壁岩体完整性相对较好;断层两侧均有 2~15 m 不等宽的断层影响破碎带,影响破碎带内岩体结构面较发育,结构面发育方向以 NNW、NEE 向为主,多为陡倾角结构面,影响破碎带内局部分布地下水渗出处,其中以¹引水隧洞南侧较为明显。整个断层破碎带及影响带宽度 7.5~18 m。

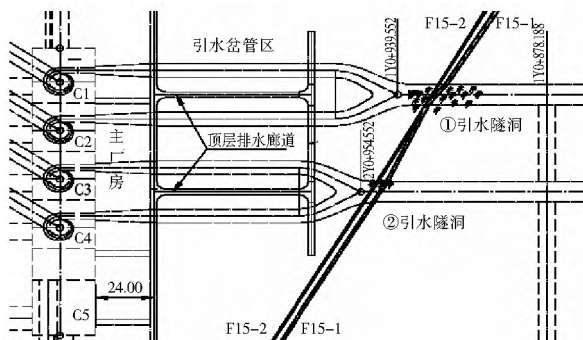


图 1 某抽水蓄能电站断层 F15 位置分布

Fig. 1 Distribution map of fault F15 in a pumped storage power station

2 断层及其影响带的高水压水试验结果

2.1 高压压水试验方案布置

为揭示 F15 断层带在高压水作用下的渗透性和渗透稳定性,以及是否会受高压水的冲蚀、劈裂,为工程处理提供设

计依据,对 F15 断层及其影响带进行现场高压压水试验。现场高压压水试验布置于¹引水隧洞北侧壁 F15 断层至¹/₄施工支洞一带(图 2),包括 1 个水平试验孔(1 号试验孔)和 1 个近铅直试验孔(2 号试验孔)。水平试验孔布置于¹引水隧洞与¹/₄施工支洞交汇处北侧壁,用于模拟两引水隧洞一洞运行一洞放空运行工况,其内布置岩体试验段和断层带试验段,考虑 F15 断层在两引水隧洞间的跨越长度 41.2 m,两引水隧洞间最小距离 36 m,水平试验孔内断层试验段与洞壁间沿断层的水平距离为 35 m。近铅直试验孔布置于 F15 断层东侧近 F15 断层,用于模拟高压水对顶层排水廊道等相邻洞室的影响情况,该孔主要针对断层带进行高压压水试验,试验段与洞底最小高差 30.5 m。

测试孔布置:包括 8 个渗压测试孔和 2 个多点位移计测试孔,其中 4 个渗压测试孔(1 号、2 号、3 号、5 号测试孔)和 1 个多点位移计测试孔(4 号测试孔)按水平和铅直两个方向布置于水平试验孔周边,渗压测试包括断层和岩体两部分,测试段与试验段对应,间距 6 m 左右;3 个渗压测试孔(8 号、9 号、10 号测试孔)按同一断面不同高程布置于近铅直试验孔的断层侧,此外,两试验孔之间在同一断面水平或近水平方向布置 1 个渗压测试孔(7 号测试孔)和 1 个多点位移计测试孔(6 号测试孔)。测试孔与试验孔间距由近至远按 6~14 m 递增。水平试验孔与其周边渗压测试孔、多点位移计测试孔组成第一组高压压水试验系统,近铅直试验孔与其周边渗压测试孔、多点位移计测试孔组成第二组高压压水试验系统。

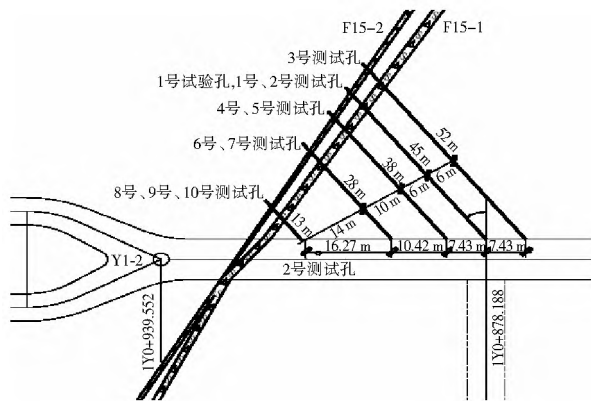


图 2 高压压水试验方案布置

Fig. 2 Layout of high water pressure test scheme

2.2 高压压水试验结果

(1) 水泥灌浆前。当水压力为 4.0 MPa 时,9 个试验孔的最大压入流量差异较大,说明岩体透水性极不均一,试验孔的最大压入流量达 63.2 L/min,最小压入流量为 0.2 L/min,平均最大压入流量为 15.6 L/min,且最大压入流量大于 20 L/min 的有 3 个孔,占总试验孔数的 1/3。在高压水时,岩体渗水量突然加大,此时对应的水压力可以认为是岩体的水力劈裂压力,试验成果见表 1。各试验孔流量突增时所对应水压力一般介于 3.0~3.5 MPa,最小为 2.25 MPa,小于 3.8 MPa 的试验段占总试验段的百分比高达 89%,大于 3.8 MPa 占 11%,说明断层带岩体在电站运行时的高水压下容易产生水力劈裂。

(2) 水泥灌浆后、化学灌浆前。当水压力为 4.0 MPa 时, 9 个试验孔的最大压入流量差异性较小, 说明通过水泥灌浆后岩体透水性明显降低, 各试验孔的最大压入流量达 7.5 L/min, 最小压入流量为 0.1 L/min, 平均最大压入流量为 2.1 L/min, 最小压入流量为 10 L/min, 大于 5 L/min 的有 2 孔, 占总试验孔数的 11%。在高水压时, 部分试验孔段的岩体渗水量突然加大, 此时对应的水压力可以认为是水泥灌浆后岩体的水力劈裂压力, 试验成果见表 1。各试验孔流量突增时所对应的水压力一般大于 3.5 MPa, 较水泥灌前增大 0.5 MPa 以上, 但仍有 56% 的试验段小于 3.8 MPa, 大于 3.8 MPa 的占 44%。

(3) 化学灌浆后。当水压力为 4.0 MPa 时, 15 个试验孔的最大压入流量差异性较小, 各试验孔的最大压入流量达 5.5 L/min, 最小压入流量的最小值为 0 L/min, 平均最大压入流量为 1.1 L/min, 最大压入流量均小于 10 L/min, 大于 5 L/min 的占总试验孔数的 8%。在高水压时, 部分试验孔段出现岩体渗水量突然加大现象, 此时所对应的水压力可以认为是化学灌浆后岩体的水力劈裂压力, 试验成果见表 1。达到设计要求的正常结束的灌浆孔区, 流量突增时所对应的水压力较化灌前有较明显改善, 其流量突增时所对应的水压力均大于 3.5 MPa, 大于 3.8 MPa 的试验段占 83%, 小于 3.8 MPa、大于 3.5 MPa 的占 17%。表 2 给出了不同防渗条件下岩体水力劈裂压力在不同区间所占的百分比。

表 1 F15 断层及其影响带高压水试验成果

Table 1 Statistical results high water pressure test in F15 fault and its influencing zones

实测值	最大压入流量/(L·min ⁻¹)		流量突增时压力/MPa			
	灌前	水泥灌后 化灌前	化灌后	灌前	水泥灌后 化灌前	化灌后
最大值	63.2	7.5	5.5	> 4.0	> 4.0	> 4.0
最小值	0.2	0.1	0	2.25	3.1	3.1
平均值	15.6	2.1	1.1			

表 2 不同防渗条件下岩体水力劈裂压力所占百分比

Table 2 Percentages of hydraulic fracture pressure under different anti seepage conditions (%)

防渗措施	水力劈裂压力 P/MPa				
	P < 3.0	3.0 ≤ P < 3.5	3.5 ≤ P < 3.8	3.8 ≤ P < 3.8	P ≥ 3.8
灌浆前	11.1	55.6	22.2	11.1	
水泥灌浆	0.0	16.7	38.9	44.4	
水泥灌浆+ 化学灌浆	0.0	0.0	17.0	83.0	

3 断层及破碎带岩体水力劈裂机理分析

从高压水试验结果发现, 水泥灌浆前, 岩体发生水力劈裂的压力小于 3.8 MPa 的占 89%; 灌浆后(包括水泥灌浆和化学灌浆), 绝大部分岩体的水力劈裂压力值提高了, 即大于 3.8 MPa, 约 17% 试段岩体的水力劈裂压力值介于 3.5~3.8 MPa 之间。2 次充水试验表明, 当水道内充水高程为 381.5 m 和 388.25 m 时, 水道内的最大静水压力能够达到 3.6~3.75 MPa 左右, 已经接近或高于 17% 试段岩体的水力劈裂压力值, 表明许多地段岩体所承受的静水压力高于岩体

的水力劈裂压力值。但是, 渗流量的观测表明岩体此时并没有发生劈裂。

经分析后认为断层及破碎带岩体灌浆后, 当水道中的静水压力超过其水力劈裂值时, 没有发生水力劈裂的原因可能包括: 一是不能依据压力增加的绝对值来判断岩体是否发生劈裂, 应根据压力增加的相对大小来判断; 二是尽管水道内的水压力很高, 但水道内的水流通过钢筋混凝土渗漏到围岩灌浆圈时, 由于其渗透性较小, 会损失一部分水头, 实际的水压力比水道内的静水压力要低; 三是与岩体的二次劈裂压力有关。下面分别讨论这 3 个因素。

(1) 根据水压力的相对增量来判断岩体是否发生水力劈裂。假定压水试验孔形成以前, 压水试验孔处的水位为 H_0 (图 3(a)); 在压水试验孔形成后, 由于该孔的作用相当于排水孔, 因此, 该处的水位会存在不同程度的下降, 设此时的水位为 H_1 (图 3(b))。如果压水试验孔不止 1 个, 则多个压水试验孔会形成排水孔群, 此时水位下降得更多, 甚至下降到有的试验孔高程以下(图 3(c))。下降的水位 ΔH_1 可表示为:

$$\Delta H_1 = H_0 - H_1 \quad (1)$$

压水试验结束后、充水试验之前, 将这些试验孔进行封堵后, 由于试验孔周围的地下水位比试验孔处的水位高, 再加上降雨以及做试验时压入水量等因素的影响, 试验孔处的水位会逐渐上升(图 3(d))。假定充水试验时该试验孔的水位为 H_2 , 显然有 $H_2 \geq H_1$ 。此时相对于初始水位 H_0 , 下降的水位 ΔH_2 可以表示为:

$$\Delta H_2 = H_0 - H_2 \quad (2)$$

设高压水试验时, 水力劈裂的试验压力为 P_1 , 则此时岩体水压力的相对增加量 ΔP_1 可以表示为:

$$\Delta P_1 = P_1 - \rho g H_1 = P_1 - \rho g (H_0 - \Delta H_1) \quad (3)$$

假定充水试验时, 水道内的最大静水压力为 P_w , 则岩体水压力在水道充水时的相对增量可以表示为:

$$\Delta P_2 = P_w - \rho g H_2 = P_w - \rho g (H_0 - \Delta H_2) \quad (4)$$

式中: ρ 为水的密度 (10^3 kg/m^3); g 为重力加速度, 近似取 10 N/kg 。

下面判断 ΔP_1 和 ΔP_2 的大小。令式(3)减去式(4), 得:

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = (P_1 - P_w) + \rho g (H_2 - H_1) = (P_1 - P_w) + \rho g (\Delta H_1 - \Delta H_2) \quad (5)$$

令 $\Delta H = H_2 - H_1 = \Delta H_1 - \Delta H_2$, 则式(5)变为:

$$\Delta P_1 - \Delta P_2 = (P_1 - P_w) + \rho g \Delta H \quad (6)$$

显然, 做压水试验时的水位应低于压水试验结束后, 试验孔被封堵后的水位, 即 $\Delta H \geq 0$ 。

1 当 $P_1 \geq P_w$, 即岩体水力劈裂值大于水道内的充水水压时, 则 $\Delta P_1 \geq \Delta P_2$, 此时, 岩体不发生水力劈裂。

2 当 $[(P_w - P_1)/\rho g] > \Delta H$, 即水道内的静水压力与岩体水力劈裂压力之差大于压水试验孔封堵后的水位上升值时, 则 $\Delta P_1 < \Delta P_2$, 此时岩体发生水力劈裂。

3 如果 $P_2 < P_w$, 但 $[(P_w - P_1)/\rho g] \leq \Delta H$ 时, 此时 $\Delta P_1 \geq \Delta P_2$, 岩体不发生水力劈裂。充水试验时, 引水系统沿线围岩没有发生水力劈裂, 可能属于这种情况。即水道内的静水压力大于岩体的水力劈裂压力值, 但它们的差值小于压水试验孔封堵后的水位上升值。

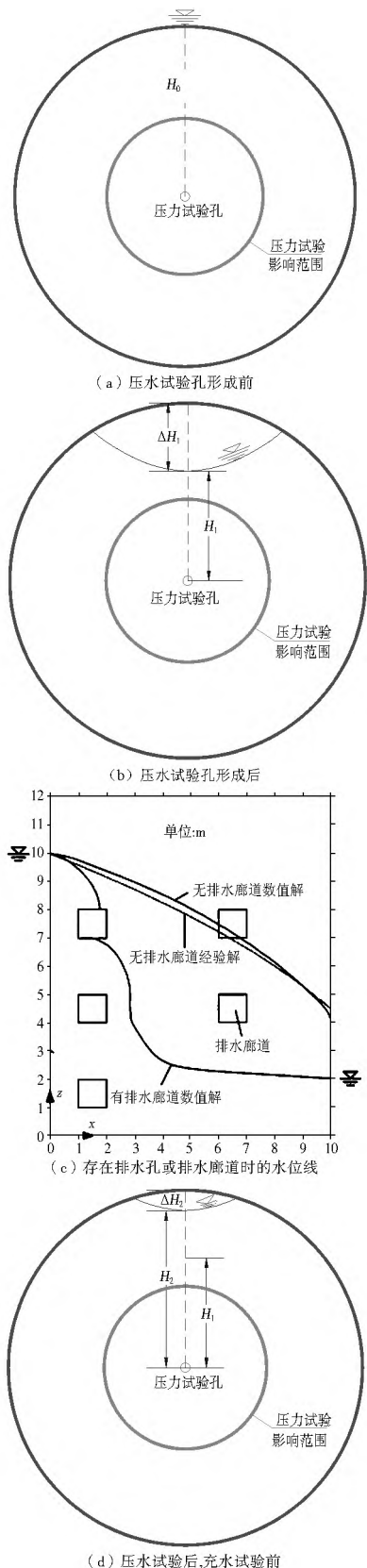


图 3 不同施工条件下压水试验孔的水位变化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of variations of water levels in the water pressure test hole under different construction conditions

能够有效地增加沿程的水头损失,使得水道内的水流通过这些防渗措施后,防渗圈外的岩体所承受的来自水道内的压力大大降低。因此虽然水道内的静水压力很高,但是当水道内的水压力传至防渗圈外的岩体时,此时岩体所承受的水压力可能低于岩体水力劈裂时的压力,故岩体没有发生劈裂。例如在引水系统充水(第一次充水试验)时,当水道内的水位上升至 381.5 m 以上时,1 号渗压计的最大读数为 329 m 左右,比水道内的水位减小近 30 m,如果此处岩体的水力劈裂压力为 3.4 MPa,则根据水道内的静水压力 3.57 MPa 判断,岩体发生了劈裂,但该处的实际水压力为 3.29 MPa,小于水力劈裂压力值,故岩体没有发生水力劈裂。因此不宜用水道内的静水压力与岩体的实际劈裂压力比较来判断岩体是否发生了劈裂,还应把沿程的水头损失考虑进去。

(3) 可能未达到岩体的二次劈裂压力值。高压压水试验资料表明,随着高压水压力的增加,岩体可能发生多次劈裂,但相邻两次水力劈裂压力值相差较大,一般都超过 0.5~1 MPa^[7]。根据压水试验的结果,灌浆后岩体的水力劈裂压力一般能够达到 3.5 MPa,试验时水道内的静水压力为 3.6 MPa 左右,可能个别地方的岩体发生了水力劈裂,但由于静水压力值在水力劈裂临界值附近,且做压水试验获得的水力劈裂值仅仅代表某个点的水力劈裂值,考虑到岩体的非均质性和各向异性,实际岩体能够承担比试验值更高的水压力。因此即使个别地方发生了水力劈裂,但由于后续水压力不再增加,所以岩体劈裂不明显,渗漏量也没有发生明显的变化。此外,岩体发生第二次劈裂还需要更大的水压力,对于一些渐近劈裂,每次劈裂其压力至少增加 0.5 MPa,有的甚至要增加 2 MPa。

4 结论

某抽水蓄能电站 F15 断层及其影响带岩体在灌浆前、水泥灌浆和化学灌浆后,岩体的水力劈裂压力明显提高,但仍有 17% 试段岩体的水力劈裂压力值介于 3.5~3.8 MPa 之间,水道充水试验结果表明,岩体没有发生水力劈裂。分析表明:水道内的静水压力可能大于岩体的水力劈裂压力值,但它们的差值可能小于压水试验孔封堵后的水位上升值;钢筋混凝土衬砌和围岩灌浆圈有减压的作用,远程水头出了损失;岩体所受的水压力处于一次劈裂压力的临界状态,可能未达到岩体的二次劈裂压力值。

参考文献(References):

[1] 李宗利. 岩体水力劈裂机理研究及其在地下洞室围岩稳定分析中应用[D]. 南京: 河海大学, 2005. (LI Zong-li. Rock Hydraulic Fracturing Mechanism Study and Its Application in the Analysis of the Underground Caverns Surrounding Rocks Stability [D]. Nanjing: HoHai University, 2005. (in Chinese))

[2] 詹美礼, 岑建. 岩体水力劈裂机制圆筒模型试验及解析理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1173-1181. (ZHAN Mei-li, CEN Jian. Cylinder Model Test of Rock Hydraulic Fracturing and Study on the Analytical Theory[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1173-1181. (in Chinese))

(下转第 66 页)

事活动,而且在冰情预报中应用时还可提高预报目标的相关系数和预报的精度。

参考文献(References):

- [1] 王涛. 基于神经-模糊理论的冰情预报研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012. (WANG Tao. Using Neuro Fuzzy to Forecast Ice Condition[D]. Beijing: China Institution of Water Resource and Hydropower Research, 2012. (in Chinese))
- [2] 刘连希, 吴吉才. 关于十三陵抽水蓄能电站上库冬季运行结冰问题的探讨[J]. 水利水电技术, 2001, 32(3): 33-35. (LIU Lianxi, WU Jicai. Ice Condition of Winter Operation in Upper Reservoir of Mingtombs Pumped Storage Power Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(3): 33-35. (in Chinese))
- [3] 李若宏. 黄河流域实用水文预报方案[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会水文局, 1989. (LI Ruohong. Hydrological Forecast Method of Yellow River Basin[R]. Zhengzhou: Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, 1989. (in Chinese))
- [4] 可素娟, 王敏, 饶素秋, 等. 黄河冰凌研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000. (KE Sujuan, WANG Min, RAO Suqiu, et al. Study of Yellow River[M]. Zhengzhou: Water Resources Press of Yellow River, 2000. (in Chinese))
- [5] 蔡琳. 中国江河冰凌[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008. (CAI Lin. China River Ice[M]. Zhengzhou: Water Resources Press of Yellow River, 2008. (in Chinese))
- [6] 马光华, 王华勇. 中国民间历书[M]. 北京: 农业出版社, 1993. (MA Guanghua, WANG Huayong. Chinese Folk Almanac[M]. Beijing: Agricultural Press, 1993. (in Chinese))
- [7] 徐振韬. 中国古代天文学字典[K]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009. (XU Zhen tao. Astronomy Dictionary of Ancient Chinese[K]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [8] 中国科学院紫金山天文台. 2012年中国天文年历[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (Purple Mountain Observatory of China Academy of Science. 2012 Chinese Astronomical Year Book[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [9] 王涛, 杨开林. 神经网络理论在南水北调冰期输水中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1403-1408. (WANG Tao, YANG Kaolin. Forecast on Winter Water Diversion Using Artificial Neural Networks in South to North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1403-1408. (in Chinese))
- [10] WANG Tao, YANG Kaolin, GUO Yongxin, Application of Artificial Neural Networks to Forecasting Ice Conditions of the Yellow River in the Inner Mongolia Reach[J]. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 2008, 13(9): 811-816.
- [11] WANG Tao, YANG Kaolin, GUO Yongxin. River Ice Conditions Forecast by Artificial Neural Networks. 16th IAHR-APD 2008 and ISHS-IAHR, October, Nanjing, China, 2008: 1919-1923.
- [12] WANG Tao, YANG Kaolin, FU Hui. Ice Forecast by Artificial Neural Networks in South to North Water Diversion Middle Route Project. 20th IAHR-APD Congress, 2010.
- [13] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 自适应神经模糊推理系统在冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 112-117. (WANG Tao, YANG Kaolin, GUO Xinlei, et al. Ice Condition Forecast based on Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System for Inner Mongolia Reach of Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 112-117. (in Chinese))
- [14] GB/T 22482-2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22482-2008, Hydrographic Forecast Standard[S]. (in Chinese))
- [3] 王国庆, 谢兴华, 速宝玉. 岩体水力劈裂试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 480-484. (WANG Guoqing, XIE Xinghua, SU Baoyu. Experimental Study on the Hydraulic Fracturing of Rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(4): 480-484. (in Chinese))
- [4] 盛金昌, 赵坚, 速宝玉. 高水头作用下水工压力隧洞的水力劈裂分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1226-1230. (SHENG Jinchang, ZHAO Jian, SU Baoyu. Hydraulic Fracture Analysis of Hydraulic Pressure Tunnel Under the Action of High Head[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1226-1230. (in Chinese))
- [5] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573-576. (HUANG Runqiu, WANG Xianeng, CHEN Longsheng. Hydraulic Fracture Analysis of Deep Buried Tunnel Gushing Process[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 573-576. (in Chinese))
- [6] 陈益峰, 周创兵, 郑宏. 含复杂渗控结构渗流问题数值模拟的SVA方法[J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 89-95. (CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing, ZHENG Hong. The Complex Seepage Control Structure with SVA Numerical Simulation Method of Seepage Problems[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2009, 28(2): 89-95. (in Chinese))
- [7] 蒋中明, 傅胜, 李尚高, 等. 高压引水隧洞陡倾角断层岩体高压水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 27(11): 2318-2323. (JIANG Zhongming, FU Sheng, LI Shang-gao, et al. Experimental Study of High Pressure Water Pressure Tunnel of High angle Fault Rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 27(11): 2318-2323. (in Chinese))

(上接第62页)