

文章编号: 1000-7598-(2007) 01-0051-06

钢衬钢筋混凝土压力管道外包 混凝土的裂缝控制研究

龚国芝, 张 伟, 伍鹤皋, 马善定

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 基于钢衬钢筋混凝土压力管道在设计荷载下外包混凝土将带裂缝工作的基本承载特性, 以缓解开裂与限裂间的矛盾为指导思想, 将减小坝后背管外包混凝土裂缝宽度和提高开裂管道的耐久性作为研究目的, 结合模型试验和有限元法, 研究了一些裂缝控制措施的应用效果, 以及有效的计算内水压力下钢衬外包混凝土裂缝宽度的公式。结果表明: 总用钢量相同时, 减薄钢衬, 加大钢筋用量, 减小裂缝宽度效果明显; 减薄钢衬外包混凝土厚度, 也可减小裂缝宽度; 性能可靠的防水涂料具备黏接性强和变形能力高的基本性质, 可进一步研究其对提高管道耐久性的长期作用; 采用 II-780-83 规范中的裂缝宽度公式, 计算结果与模型试验结果较为符合。

关 键 词: 钢衬钢筋混凝土压力管道; 模型试验; 钢筋混凝土非线性有限元; 裂缝控制; 耐久性

中图分类号: TV 732.4

文献标识码: A

Study on crack control of concrete wall of steel lined reinforced concrete penstocks

GONG Guo-zhi, ZHANG Wei, WU He-gao, MA Shan-ding

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The concrete wall would crack under design load, which is the fact and one of working principles in steel lined reinforced concrete penstocks. In order to release the contradiction between cracking and limiting crack width, model tests and FEM are adopted to study on some measures of crack control, and calculation method of crack width. The results show that cracking width would decrease when using more bars and thinner lining, that cracking width would decrease slowly when reducing the thickness of concrete wall, that waterproof painting has the better properties of cementation and deformation, and can be studied on improve durability of materials by long-term tests, and that the result using the calculation method in code II-780-83 to calculate crack width, is coincident with the result of model test.

Key words: steel lined reinforced concrete penstocks; model test; nonlinear finite element method of reinforced concrete; crack control; durability

1 引 言

钢衬钢筋混凝土结构的基本工作原理为: 钢衬与外包钢筋混凝土联合承载, 设计荷载下外包混凝土径向开裂。混凝土主要承压和传递径向力, 钢衬与钢筋主要承受内水压力产生的环拉力, 从而充分发挥钢材抗拉强度高的优点。外包钢筋混凝土开裂是这种管道结构的基本承载特征之一, 模型试验、原型监测和计算分析也都证实了这一特征^[1, 2]。然而, 各种因素影响下可能使管道外包混凝土裂缝宽

度较大, 长期运行还会对材料的耐久性, 甚至结构的安全承载能力造成不良影响。

坝后背管内在的开裂与限裂间的矛盾一直是国内外工程研究人员关注的问题。有效的裂缝控制措施是缓解这一矛盾的主要途径, 其主要分为两类: 减小缝宽措施和提高耐久性措施, 前者重在研究限裂方法, 后者重在研究“补裂”方法。减小缝宽措施主要通过引入新工艺、新材料或采用一定的构造措施和设计措施来减小缝宽, 如采用预应力混凝土压力管道技术^[3], 增大了混凝土的开裂荷载, 减小

了裂缝宽度；采用钢纤维混凝土和钢衬钢纤维自应力混凝土^[4]，使混凝土硬化过程中产生自应力，并提高了混凝土材料的抗拉强度，也可增大混凝土的开裂荷载，减小裂缝宽度；背管施工时在初始开裂处设预裂缝，人工控制裂缝的发生和发展^[5]，减小裂缝的影响范围。提高耐久性措施主要通过设观测设施，当混凝土开裂后，采用涂刷防护材料等方法充填裂缝区域，达到提高管道耐久性的作用。

考虑到坝后背管既要遵循联合承载的工作原理，又要保证管道的耐久性，认为裂缝控制的基本思想可为：允许混凝土开裂，发挥钢材高强作用，用减小缝宽措施尽量限裂，再辅以“补裂”措施，以提高开裂管道的耐久性。基于这一思想，本文通过模型试验法研究了减小裂缝宽度的设计措施，以及表面涂刷防水涂料提高耐久性的可行性，并以有限元法进行了对比分析，推荐了与模型试验较为一致的缝宽计算公式。

2 模型试验概况

2.1 工程背景和研究内容

以某碾压混凝土重力坝下游面钢衬钢筋混凝土压力管道工程为研究背景，最大坝高为 160 m，厂房坝段宽为 30 m。考虑到设计地震烈度为 IX 度，背管段采用浅预留槽的布置形式，下游坝面以下的

留槽深度为 6.75 m，约 1/2 的管体在坝面以内，钢衬外包钢筋混凝土厚度为 1.5 m，管径 10.5 m。管道剖面形状为方形加小贴角，贴角边长为 1 m，斜直段管侧与坝体相接处以垫层分隔，底部以插筋和键槽与坝体相接^[6]。按规范^[7]方法确定了管道钢材用量，环向钢筋 3 层，其中靠管道内壁布置 1 层，距钢衬外表面为 100 mm，靠管道外壁布置 2 层，钢筋中心间距 200 mm，外层钢筋混凝土保护层厚度为 80 mm。

取管道斜直段 3/4 处的断面为研究对象，设计内水压力为 1.23 MPa，采用平面结构模型，对内水压力作用下，钢材配置与裂缝宽度的关系、钢衬外包混凝土厚度与裂缝宽度的关系，以及涂刷防水涂料的短期效应进行试验研究。

2.2 模型尺寸、材料和制作

模型试验按几何相似和物理相似原理设计，考虑试验条件和测试要求，选定原型与模型的几何比尺为 26.25:1，沿管轴线方向取 100 mm，材料弹性模量和内水压力相似常数均为 1，忽略体力的影响，则应力和应变相似常数均为 1，位移相似常数为 26.25。制作了 3 组平面模型，称为 A 组、B 组和 C 组，每组包含 2 个对比模型，称为 A₁、A₂ 等，共计 6 个模型。原型与各组试验模型的基本参数见表 1。

表 1 模型与原型基本参数
Table 1 Parameters of test models and prototype

模型与原型编号	钢管内径 / mm	管道沿水流向长度 / mm	管壁混凝土厚 / mm	钢衬厚 / mm	钢筋配置	钢筋折算厚 / mm	含筋率 / %
原型	10 500		1 500	28	3 层 ϕ 32@200	12.06	0.804
A 组模型	400	100	57	1.0	内 4 根 ϕ 3.0 外 4 根 ϕ 3.0	0.565	0.99
B 组模型	400	100	57	0.5	内 7 根 ϕ 3.0 外 8 根 ϕ 3.0	1.059	1.86
C 组模型	400	100	38	1.0	内 4 根 ϕ 3.0 外 4 根 ϕ 3.0	0.565	1.49

为研究钢材配置和钢衬外包混凝土厚度对裂缝宽度的影响，A 模型的钢材配置和管壁厚度按原型结构的相似常数模拟。在 A 模型基础上，B 模型保持用钢量不变，钢衬厚度减半，增加钢筋用量。在 A 模型基础上，C 模型钢材配置都不变，管壁厚度减至 A 模型的 2/3。

模型选用仿真材料，钢衬采用 A3 钢板，钢筋采用冷拉退火钢丝，内层钢筋均呈螺旋状布置，外层钢筋沿混凝土外轮廓呈马蹄形布置。坝体混凝土按 C20、管道混凝土按 C25 进行配合比设计。坝体混凝土与管道混凝土分两期浇筑，先浇坝体混凝土，然后浇管道混凝土。管道与坝体相连的小贴角以上直边相接部分用 1 mm 厚的聚苯乙烯 PS 泡沫板

将其隔开，泡沫板的弹性模量为 2.73 MPa，管道下部与坝体相连处，浇二期混凝土时进行了凿毛处理，使两期混凝土形成整体。模型在室内自然条件下养护 28 d。各组试验模型的几何尺寸及钢筋位置见图 1。

2.3 测点布置与试验装置

模型试验荷载只考虑内水压力，采用套筒式的加压装置，加压内套筒外直径为 380 mm，钢管与内套筒间为 10 mm 的加压空腔，在空腔两端用橡胶密封圈密封，形成一个密封的加压空腔，在模型两边用法兰盘将内套筒固定，用油泵将油注入加压空腔模拟径向内水压力，进行加压试验。模型试验加压示意图和试验设备布置如图 2。

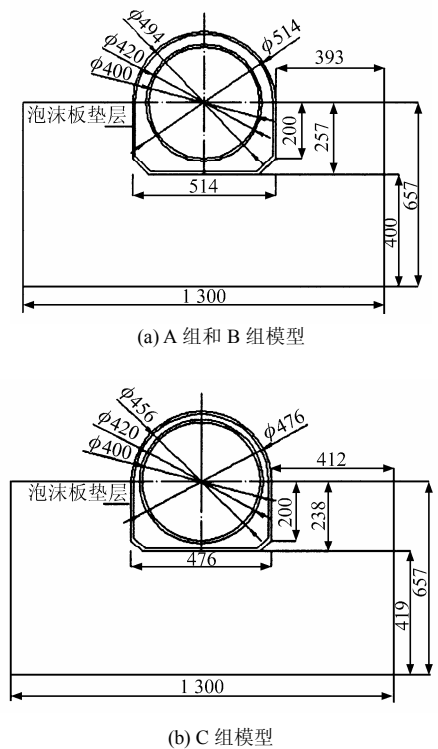


图 1 试验模型的几何尺寸和钢筋位置(单位: mm)
Fig. 1 Dimensions of test model and layout of bars (unit: mm)

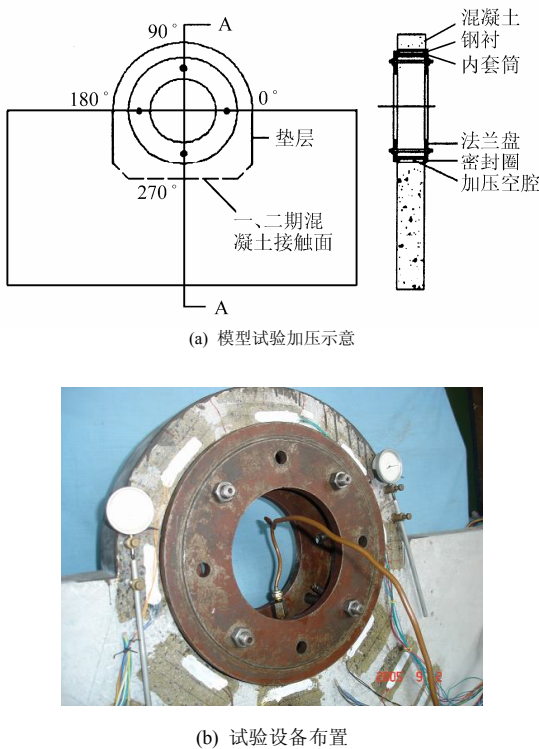


图 2 模型试验加压示意和试验设备布置
Fig. 2 Forcing system and equipment set of model test

为量测钢衬、钢筋、混凝土应变值，钢衬和混凝土沿圆周向每隔 45° 分别贴环向箔基电阻应变计和纸基电阻应变计，钢筋沿圆周向每隔 90° 贴环

向箔基电阻应变计。采用应变测试仪器量测应变，通过计算机直接整理出应力-荷载曲线。

考虑到试验目的是研究裂缝控制措施，量测缝宽用较直观的千分表进行，模型开裂后，在设计压力附近往返加载多次以后，找出最宽的 2 条裂缝，然后在模型上、下端面裂缝处各设一个千分表，读取两面的缝宽，取其平均值作为该条裂缝的缝宽。应力和缝宽测试完后，在模型管道外表面涂刷防水涂料，然后继续加载，加载过程中继续测量模型的缝宽和钢材的应力。

3 试验结果

3.1 裂缝开展

模型的初裂荷载和位置见表 2，同时也给出了第 2 条裂缝的开裂荷载和位置，方位角见图 2(a)。

表 2 模型第 1, 2 条裂缝开裂荷载和位置
Table 2 Load level and place of the first and the second cracks on test models

模型 编号	第 1 条裂缝 开裂荷载/MPa	第 1 条裂缝 位置/(°)	第 2 条裂缝 开裂荷载/MPa	第 2 条裂缝 位置/(°)
A1	1.23	159	1.3	0
A2	1.3	16	1.3	158
B1	1.6	18	1.7	154
B2	1.3	18	1.3	109
C1	1.0	38	1.1	180
C2	0.8	0	0.8	143

外包混凝土厚度对结构的初裂荷载影响较大，A 模型和 B 模型初裂荷载较接近，约为 1.3 MPa，比 C 模型初裂荷载大，由此可知，外包混凝土厚度越薄，则初裂荷载越小，这一规律基本与厚壁圆筒弹性分析规律一致。各模型初裂位置在管腰 0° 或 180° 断面附近，由于管壁混凝土厚度较薄，只要裂缝一经产生，管壁混凝土一裂即穿。第 2 条裂缝的开裂荷载与初裂荷载相差较小，位置一般为与初裂位置同一直径的另一断面上。

3.2 稳定裂缝分布

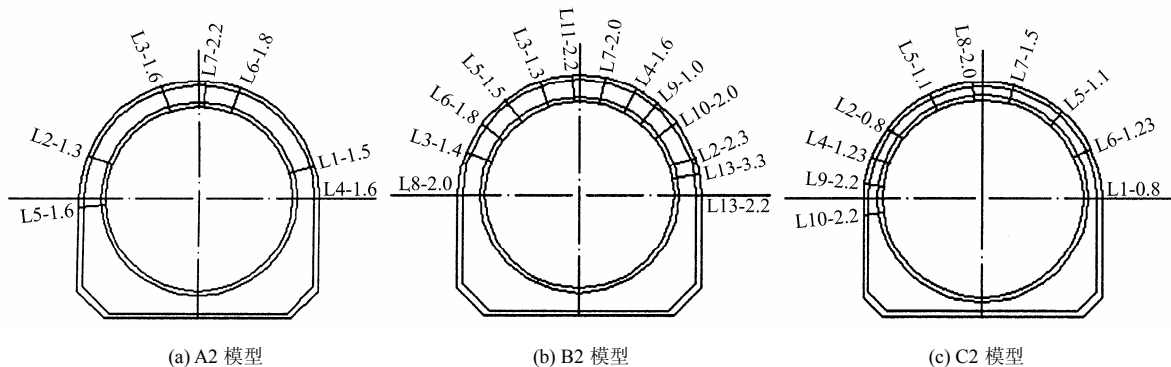
经多次加卸载后，各组试验模型的裂缝开展基本稳定，A2、B2 和 C2 的裂缝分布如图 3。图中标识 L 表示裂缝，第 1 个角标表示裂缝顺序，角标横线后的数值表示该裂缝出现时的荷载 (MPa)。个别裂缝出现顺序晚，开裂荷载反而小，表示重复加载以后出现的裂缝。

从裂缝分布情况看，同级荷载下，B 组模型裂缝条数多，且分布均匀；其次是 C 组；而 A 组模型

不仅裂缝条数较少、而且分布不均匀。说明在总用钢量相同的情况下,提高含筋率,钢筋采用细而密布,能使裂缝间距减小,条数增加,而裂缝宽度减小。同时也可见,管道上半部裂缝较多,且分布较均匀,下半部裂缝较少,当内压为 2.4~2.6 MPa,即大约为设计内水压力的 2 倍时,管道下部垂直边开裂,管坝间的垫层分隔使裂缝未延伸至坝体。

3.3 缝宽随水压变化规律

由以往试验资料可知,先出现的裂缝一般都比后出现的裂缝宽度大,本次模型试验则重点观测了各模型前两条裂缝的宽度随内水压的变化。表 3 给出了多次加卸载使裂缝相对稳定后,不同内水压下各模型前两条裂缝的宽度值。图 4 给出了 3 组模型前 2 条裂缝缝宽均值随水压的变化曲线。



宽度。而当钢材和钢筋配置相同, 仅减薄混凝土厚度, 间接增加含筋率时, 对减小裂缝宽度也有效果, 但在荷载较低时效果不明显, 当荷载增加时, 效果将逐渐明显起来, 原因是荷载越高, 钢筋应力变化越大, 对缝宽的影响也越明显。

3.4 防水涂料试验研究

提高背管开裂区材料耐久性的主要措施是对开裂区表面涂刷防护材料。以往试验研究了刚性防水材料, 该材料由于塑性变形能力差, 对提高耐久性效果不理想。通过短期模型试验, 本文研究了喷涂柔性防水涂料的黏接性能和变形能力。试验选用浙江中远防水涂料厂生产的双组分合成高分子防水涂料, 及其合成丙烯酸脂高分子乳液为基料, 加入无机固化剂和多种助剂, 现场复合成双组分防水涂膜材料, 具有良好的成膜性、耐久性和耐水性。

试验过程为: 当模型强度和裂缝宽度测试结束后, 将内压回零; 然后在各模型的外表面按涂料要求的施工程序进行涂刷, 用羊毛刷涂刷4遍, 每遍厚度约0.2 mm左右, 实际涂刷总厚度在1 mm以内; 防水涂料完全固化后对模型进行加载试验。加载过程中, 当内水压达设计值1.23 MPa时, 模型缝宽在0.1 mm以内, 管外防水涂料完整无损; 达1.2倍设计压力之前, 反复多次加载, 裂缝处防水涂料也未破损; 将A1模型内压加至2.6 MPa, 缝宽达到0.8 mm时, 防水涂料当时未开裂, 表面可见明显白色痕迹, 表明防水涂料已接近变形极限, 模型卸载放置2 d在白色痕迹处防水涂料断裂; 其他模型在试验过程中, 尽管缝宽已超过0.3 mm, 防水涂料都未断裂。

从试验结果来看, 这种防水涂料具备黏接性强和变形能力高的特点, 可进一步研究其对提高管道耐久性的长期作用。当管道运行过程中, 缝宽变化较大时, 为提高涂料层的变形能力和强度, 还可采用加厚涂料层, 以及在裂缝宽度较大时涂刷涂料等方法。

4 有限元对比分析

采用钢筋混凝土非线性有限元法, 仿真分析了前述3组试验模型, 得到各模型钢材应力随水压的变化规律, 结合常用裂缝宽度计算公式得到裂缝宽度的变化规律。模型A的有限元网格如图5所示。采用受拉弹性开裂和受压等向硬化弹塑性来模拟混凝土非线性行为, 分区表达混凝土承载作用下的非线性行为。以埋藏式钢筋模型模拟混凝土中的钢筋, 裂缝采用分布式模型模拟。

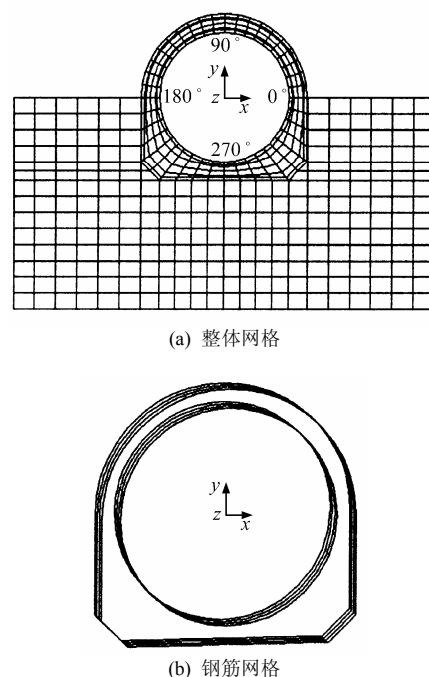


图5 模型A的有限元网格

Fig.5 Finite element mesh of model A

4.1 钢材应力

采用与各分组模型试验相同的几何尺寸和材料参数, 以有限元法得到钢材应力, 图6对比了各模型采用有限元法和模型试验法的管腰截面(0°)外层钢筋应力。

计算钢材应力与试验结果规律一致, 开裂前, 内水压力主要由混凝土承担, 钢材应力较小, 开裂后, 裂缝处的钢材应力突增。随内水压加载直至混凝土开裂和钢材屈服的过程中, 二者的应力值差别也不大。由此可见, 计算钢筋应力可用于与模型试验的缝宽对比分析和裂缝控制研究中。

4.2 裂缝宽度

裂缝发展过程与钢筋应力发展过程基本一致, 结合有限元法计算的钢材应力, 采用合理的裂缝宽度计算公式可得到与模型试验较为一致的缝宽变化规律。根据一系列常用于背管外包混凝土裂缝宽度的计算公式, 进行了缝宽变化规律对比分析, 按II-780-83(前苏联钢衬钢筋混凝土结构设计资料)中的裂缝宽度公式, 计算缝宽随水压的变化规律与试验结果符合较好, 推荐采用该公式计算内水压力下钢衬外包混凝土的裂缝宽度^[8]。

对比分析表明, 在钢筋应力和裂缝宽度方面, 有限元分析结果与模型试验结果具有较好的一致性, 可相互印证, 通过有限元法和裂缝宽度解析公式相结合的方法, 可得到原型管道的裂缝分布规律, 是研究裂缝控制措施的有效方法。

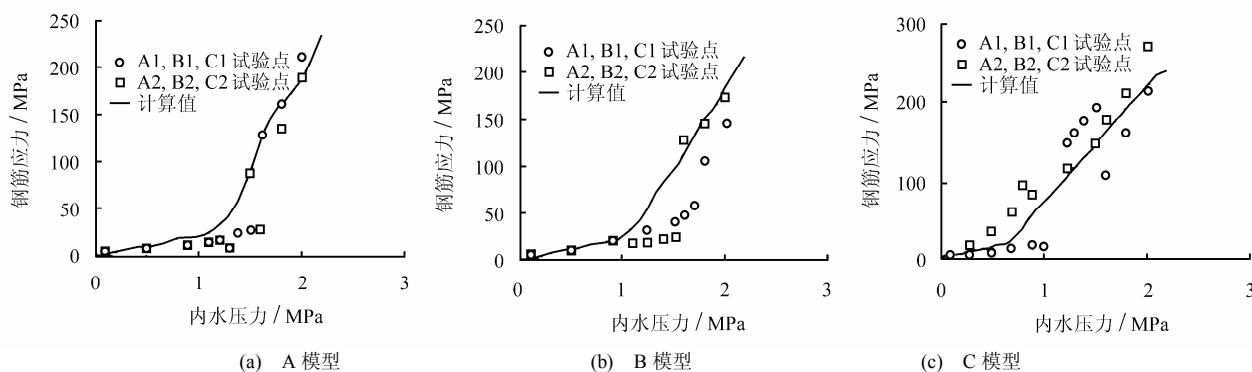


图 6 各模型的管腰外层钢筋应力对比
Fig. 6 Computed and tested stresses of outer bar at penstock's waist

5 结 论

(1) 考虑到坝后背管既要遵循联合承载的基本原则, 又要保证钢筋混凝土的耐久性, 认为裂缝控制的基本思想可为: 允许混凝土开裂, 充分发挥钢材作用, 以减小缝宽措施尽量限裂, 同时辅以“补裂”措施提高开裂钢筋混凝土的耐久性。

(2) 总用钢量相同时, 减薄钢衬, 加大钢筋用量, 直接提高含筋率, 并且采用细而密的布筋方式, 可有效地减小缝宽。

(3) 钢衬和钢筋配置相同时, 减薄钢衬外包混凝土厚度, 间接提高含筋率, 对减小裂缝宽度也有效果, 但在荷载较低时效果不明显, 当荷载增加时, 对缝宽的影响逐渐明显。

(4) 性能可靠的柔性防水涂料具备黏接性强和变形能力高的特点, 可进一步研究其对提高管道耐久性的长期作用。

(5) 采用钢筋混凝土非线性有限元法计算的钢材应力和裂缝宽度, 与模型试验结果较为一致, 可通过有限元法和裂缝宽度解析公式相结合的方法, 预测钢衬钢筋混凝土的缝宽, 以研究合理的裂缝控制措施。

(6) 根据对比分析 3 组模型试验裂缝宽度随内水压的变化规律, 推荐采用 II-780-83 规范中的裂缝宽度公式, 计算内水压力作用下钢衬外包混凝土的缝宽。

此外, 针对钢衬钢筋混凝土压力管道外包混凝土的裂缝控制问题, 以下问题仍需进一步研究: 模型与原型缝宽存在的相似比关系; 包括主要影响因素的、更为有效的缝度计算公式; 防水材料对提高材料耐久性的长期效果等。

参 考 文 献

- [1] 马善定, 熊德炎. 三峡水电站钢衬钢筋混凝土压力管道大比尺平面结构模型试验研究[R]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1994.
- [2] 马善定, 伍鹤皋, 龚国芝. 金安桥水电站坝后厂房方案压力背管结构布置及应力与变形专题研究(国内外工程实践部分)[R]. 武汉: 武汉大学水利水电学院, 2005.
- [3] 王从保. 钢衬预应力混凝土压力管道结构研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [4] 黄承逵, 何化南. 大比尺钢衬钢纤维自应力混凝土圆形管道在内水压力下的性能试验研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 39—44.
HUANG Cheng-kui, HE Hua-nan. Experimental study of the behaviors of the steel lined steel fiber reinforced self-stressing concrete penstocks under internal water pressure[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2005, 24(5): 39—44.
- [5] 张莉, 王秋玲. 李家峡水电站设缝背管试验研究[J]. 西北水电, 1995(1): 13—18.
ZHANG Li, WANG Qiu-ling. Study on penstocks with crack in Lijiaxia Hydropower Station using model test[J]. *Journal of Northwest Hydroelectricity*, 1995(1): 13—18.
- [6] 伍鹤皋, 张伟, 马善定. 金安桥水电站坝后厂房方案压力背管结构布置及应力与变形专题研究(有限元分析部分)[R]. 武汉: 武汉大学水利水电学院, 2005.
- [7] DL/T 5141—2001. 水电站压力钢管设计规范[S].
- [8] 龚国芝, 马善定, 张伟等. 金安桥水电站坝后厂房方案压力背管结构布置及应力与变形专题研究(平面模型试验部分)[R]. 武汉: 武汉大学水利水电学院, 2005.