

管道充水过程气液两相流动力学特性分析

郭永鑫¹, 吴昊潼², 杨开林¹, 郭新蕾¹, 王涛¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 管道充水过程涉及复杂的气液两相瞬变过程, 合理分析、评价其两相动力学特性对工程的优化设计、安全运行, 以及数值模拟研究具有重要意义。基于量纲分析和相似理论, 建立了充水过程的气相模型相似律, 认为通气孔排气过程的动力相似律可近似套用重力相似律, 据此推导出了管内滞留气囊原、模型的几何比尺关系。将建立的气相模型相似律应用于南水北调北京段西四环暗涵通气孔水工模型试验, 分析了充水全过程中两相流各动力学测量参数, 得出暗涵合理的充水流量。最后采用定量和定性分析相结合的方法, 对管道中滞留气囊对输水能力的影响进行了评价。

关键词: 管道充水; 通气孔; 气液两相流; 相似律; 动力学参数

中图分类号: TV 131; O359 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)05-0065-05

Analysis of Dynamic Characteristics of Gas liquid Flow During Water-filling Process in Pipeline

GUO Yong-xin¹, WU Hao-tong², YANG Kai-lin¹, GUO Xin-lei¹, WANG Tao¹

(1. China Institute of Water Resources & Hydropower Research, State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The water filling process in pipeline involves gas liquid two phase transient flow. A reasonable analysis and assessment of the two phase dynamic characteristics is very important for the optimization design and safe operation of engineering project and numerical simulation study. Based on the dimensional analysis and similarity theory, the similarity laws of the gas phase model during the water filling process were established, and the dynamic similarity laws of the exhaust process in vents were similar to the gravity similarity laws; therefore the geometric proportion relationship of detained air bubbles in the pipeline in the prototype and model was obtained. The similarity laws of the gas phase model were applied to the hydraulic model test of the culvert air vent on the West 4th Ring Road of Beijing in the South to North Water Diversion Project, which provided the dynamic parameters of gas liquid two phase flow during the water filling process and the reasonable water filling flow rate in the culvert. Furthermore, the effects of the detained air bubbles on the conveyance capacity were analyzed quantitatively and qualitatively.

Key words: water filling pipeline; air vent; gas liquid two phase flow; similarity law; dynamic parameters

1 研究背景

管道充水涉及复杂的气液两相瞬变过程, 根据充水流量和两相流流态, 充水过程可分为快速充水和缓慢充水。管道快速充水过程中, 管内水体呈柱状推进, 气体迅速排出, 极易造成管道破坏, 如 1995 年加拿大 Edmonton 市发生 300 年一遇暴雨, 城市排水管道被迅速充满, 导致一人孔及其附属设

施被气流“吹离”管道^[1]。Zhou 等人^[1-4]、Vasconcelos 等人^[5]分别通过试验模拟了管道快速充水过程, 并基于刚性水柱和水-气垂直交界面等假定对该过程进行数值模拟。

大型管道输水工程初次运行或者周期性检修完毕后运行, 首先需要开启沿线控制设备向管道缓慢充水, 当管内气体排完, 达到设计要求时, 系统才进入正常运行环节。在这一过程中充水流量通常为设计流量的 5%~10%, 最大充水

收稿日期: 2013-01-09 修回日期: 2013-05-17 网络出版时间: 2013-08-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130823.1609.025.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109230); 南水北调办科技项目(XSH-JSFW-08); 中国水利水电科学研究院青年专项(水集 1216)

作者简介: 郭永鑫(1978-), 男, 山西阳泉人, 高级工程师, 主要从事水力学与河流动力学研究。E-mail: guoyx_1123@163.com。

流量不超过设计流量的 30%，充水满管流速通常建议为 0.3 m/s，最大充水满管流速不超过 0.6 m/s^[67]。由于管道缓慢充水时两相流态不同于快速充水，多为水平平涨，不满足快速充水数学模型中的刚性水柱和水-气垂直交界面等假定，因此工程中多采用类似于明渠单相流的数值模型对其过程进行模拟^[810]，而实体模型试验研究较少。由于单相流模型的局限性，不能解决工程中气相引起的实际问题，因此，开展必要的物理模型试验，对管道缓慢充水过程中两相流的动力学特性进行实时、准确、全过程地测量和分析，对工程优化设计、安全运行，以及数值模拟具有重要意义。

本文基于量纲分析和相似理论建立了充水过程的气相模型相似律，即通气孔排气动力相似律和管内滞留气囊的原、模型几何比尺关系，并将其应用于南水北调北京段西四环暗涵物理模型试验，对缓慢充水过程中气液两相流的动力学特性，包括管道水流压力、流量，通气孔风速、风压，管道中滞留气囊长度等，进行全过程、实时测量和分析，并给出合理的工程运行建议。

2 充水过程气相模型相似律

管道充水过程原型、模型相似律包括液相流体相似律和气相流体相似律。液相流体相似律主要为重力相似^[11]和水击波速相似^[12]，本文对此不做讨论，而主要探讨充水过程中管道及通气孔内气相的原型、模型相似性问题。

2.1 通气孔内气流的动力相似律

充水过程中，随着水流运动，水体占据管道内气体空间，压缩管道气体，除急流段附近通气孔受水流黏滞力影响有短暂进气外，大部分通气孔为排气过程。通气孔中气体主要受到内外压力差，而不是重力作用，因此液相水流的重力或 Froude 相似律不适用于通气孔内气流^[13-14]。

模型与原型动力相似的必要条件是惯性力比值与压力比值相等，因此通气孔内气体必满足欧拉压力模型相似律^[15]。在管流相似流动中，压力场的相似并不是两个流场相似的原因，而是两个流场相似的结果。在某些物理量起主要作用的场合，欧拉压力相似准则不是决定性准则，只要主要的相似准则满足，如流动边界几何形状和性质相似、各主要相似准数相等，则相似流动的欧拉数一定相等。因此，通气孔内气流相似律分析应从引起气体压强变化的主要动力因素入手。

通气孔排气过程中，引起气体压强变化的主要原因为管内水流体积的增加。假定：

(1) 通气孔排气过程中风速较小，气体可视为不可压缩流体。通气孔内风速通常较小，如规范^[16]中规定通气孔允许风速为 40~50 m/s，当通气孔风速为 48 m/s 时，气体实际产生的密度变化率仅约为 1%^[17]；

(2) 水流的掺气量很小，可忽略。已有研究表明，明渠水流平均流速约大于 6.25 m/s 时，水气交界面上的水流紊动强度才足够造成大量掺气^[14]。

根据上述假设，原型、模型通气孔排气流量可近似认为等于充水流量，即：

$$Q_{ap} \approx Q_{wp}, Q_{am} \approx Q_{wm} \quad (1)$$

式中： Q_{ap} 、 Q_{am} 分别为原型、模型排气量； Q_{wp} 、 Q_{wm} 分别为原型、模型充水流量。

而且，充水过程液相水流满足重力相似，即：

$$Q_{wp} = Q_{wm} Q_{wr} = L_r^{2.5} Q_{wm} \quad (2)$$

式中： Q_{wr} 为原型、模型水流量比尺； L_r 为长度比尺；下标 r 表示原型、模型比尺。

由式(1)、式(2)可得通气孔排气过程中原、模型气流量近似满足

$$Q_{ar} = \frac{Q_{ap}}{Q_{am}} \approx \frac{Q_{wp}}{Q_{wm}} \approx L_r^{2.5} \quad (3)$$

式中： Q_{ar} 为原型、模型气流量比尺。

由式(3)可得通气孔排气流速的原型、模型比尺为：

$$V_{ar} = \frac{V_{ap}}{V_{am}} \approx L_r^{0.5} \quad (4)$$

式中： V_{ap} 、 V_{am} 分别为原型、模型排气流速； V_{ar} 为原型、模型排气流速比尺。

由此可见，充水过程中，由于水流填充而引起的通气孔排气过程的气相模型可近似套用液相的重力相似律。

对于通气孔进气过程，气体压强变化的主要原因为水流挟气引起的负压作用，其动力相似主要考虑水流挟气能力相似。由于水流挟气能力影响因素较多，且充水过程只有少数通气孔出现短暂负压进气，因此，对通气孔进气过程的相似律此处不做讨论。

2.2 管道中滞留气囊的原、模型几何比尺关系

充水后期，管道顶部布满气囊，气囊的存在将增大管道摩擦阻，降低输水能力。管道中气囊一般不满足原型、模型几何相似条件，为了评估气囊对管道输水能力的影响，下面对原型、模型气囊的几何比尺关系进行推导。

首先给定如下假设：

(1) 原型、模型中气囊的形成、运动、压缩、溃灭过程为理想气体绝热过程(忽略气体与水体之间的传热)，遵循理想绝热完全气体热力学方程^[18-19]；

(2) 原型、模型管道中气囊形成前，管内空气可通过相邻通气孔进出，其压强接近大气压强 P_a^* ，因此在管道中气囊形成初始时刻，气囊内压强可视为大气压强；

(3) 原型、模型充水过程气囊形成前，水流运动满足重力相似，由水流波动而形成的初始气囊的体积满足几何相似；

(4) 充水终了阶段，原型、模型管道中断面含气率一般不大，认为原型、模型水的比重相等，水压满足重力相似。

由假设(1)得原型、模型气囊压强和体积的变化关系满足下式。

$$P_{p0}^* \nabla_{p0}^k = P_p^* \nabla_p^k, P_{m0}^* \nabla_{m0}^k = P_m^* \nabla_m^k \quad (5)$$

式中： k 为气体绝热指数，对于空气通常取 1.4； P_{p0}^* 和 P_{m0}^* 为原型、模型初始时刻气囊的绝对压强； P_p^* 和 P_m^* 为原型、模型任意时刻气囊的绝对压强； ∇_{p0} 和 ∇_{m0} 为原型、模型初始时刻气囊的体积； ∇_p 和 ∇_m 为原型、模型任意时刻气囊的体积；上标* 表示绝对压强。

由假设(2)得原、模型初始气囊的压强为：

$$P_{p0}^* \approx P_{m0}^* \approx P_a^* \quad (6)$$

式中： P_{p0}^* (标准大气压强) = 101 325 Pa。

由假设(3)得原、模型初始气囊的体积满足式(7)：

$$\nabla_{p0} / \nabla_{m0} = L_r^3 \quad (7)$$

由假设(4)得任意时刻原、模型气囊所受的绝对压强为:

$$P_p^* = P_a^* + P_p = P_a^* + P_m L_r, P_m^* = P_a^* + P_m \quad (8)$$

式中: P_p 和 P_m 为原、模型任意时刻气囊所受的水压。

由式(5)可得:

$$\frac{\nabla_p}{\nabla_m} = \frac{(P_{p0}^*/P_p^*)^{1/k}}{(P_{m0}^*/P_m^*)^{1/k}} \frac{\nabla_{p0}}{\nabla_{m0}} \quad (9)$$

将式(6) - (8)分别代入式(9)得:

$$\frac{\nabla_p}{\nabla_m} = \frac{(P_{p0}^*/P_p^*)^{1/k}}{(P_{m0}^*/P_m^*)^{1/k}} L_r^3 \approx \left(\frac{P_a^* + P_m}{P_a^* + P_m L_r} \right)^{1/k} L_r^3 \quad (10)$$

式(10)即为任意时刻原型、模型气囊特征体积的比尺关系。

令 L_{ap} 和 L_{am} 分别表示原型、模型任意时刻气囊的特征长度, 则由式(10)可得原型、模型气囊特征长度的比尺关系为:

$$\frac{L_{ap}}{L_{am}} \approx L_r^3 \sqrt[k]{\frac{(P_a^* + P_m)}{P_a^* + P_m L_r}} \quad (11)$$

此外, 为方便分析, 定义气囊的体积压缩率 λ 为:

$$\lambda = \left(1 - \frac{\nabla}{\nabla_0} \right) \times 100\% = \left(1 - \left(\frac{P_0^*}{P^*} \right)^{1/k} \right) \times 100\% \quad (0 \leq \lambda < 1) \quad (12)$$

式中: ∇ 为任意时刻气囊的体积; ∇_0 为初始时刻气囊的体积; P^* 为任意时刻气囊的绝对压强; P_0^* 为初始时刻气囊的绝对压强, 由假设(2)知 $P_0^* = P_a^*$ 。

体积压缩率 λ 的意义为: 任意时刻气囊所受的压强越大, 体积压缩率越大, 气囊相对于初始时刻的体积变化越大; 反之, 气囊的压强越小, 体积压缩率约小, 气囊相对于初始时刻的体积变化越小, 当压强等于初始时刻的压强时, 体积压缩率等于 0, 即气囊无压缩。

3 管道充水过程气液两相流动力学特性分析案例

本文以南水北调中线北京段西四环暗涵工程为例, 将以上建立的气相模型相似律应用于该工程, 对管道充水过程气液两相流动力学特性进行分析。

3.1 模型设计

南水北调中线北京段西四环暗涵工程位于北京交通大动脉西四环路正下方, 全长 12.64 km, 是国内第一座在城市快速路下修建的大型输水工程, 长距离有压输水涵洞的有效通气和安全充水是工程建设和运行中需解决的关键性技术问题。为了研究西四环暗涵通气孔设计变更对工程运行的影响, 以给出工程运行的安全性和合理的水力控制方法和措施, 选取西四环暗涵桩号 3+938 至桩号 9+000 之间约 5 km 典型管段进行充水过程的试验研究。该段地形起伏大, 包括顺坡、平坡、逆坡, 管道通气孔少是气液两相流动力学特性分析的理想管段。

模型采用 1:16667 正态比尺, 模拟段包括 6 个桥下通气孔和 1 个路下通气孔。模型组成包括: 上游调节水箱、进口调节闸门、调压井、直径 240 mm 长 303 m 的有机玻璃管、7 个通气孔、出口调节闸门、下游调节水箱, 以及上下游排排水系统。通气孔布置见图 1。

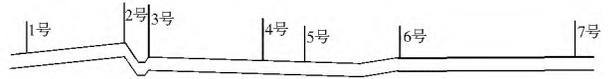


图 1 模型管道及通气孔布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pipeline and air vents in the physical model

气液两相流动力学参数采用传感器电测, 并通过多通道数据采集系统, 全过程、实时采集传感器信号。此外, 采用高清摄像机和直尺记录管道内气囊大小及其运动规律。主要量测仪器和物理量见表 1。

表 1 量测仪器和物理量

Table 1 Measuring parameters and instruments

编号	物理量	测量仪器	量程
1	通气孔风速	热式风速仪	0.05~2 或 0.05~10 m/s
2	通气孔风压	压差传感器	0~4 kPa
3	管道水流量	电磁流量计	0.0848~100 m³/h
4	管道水压	压力传感器	0~50 kPa
5	闸门开度	位移传感器	0~500 mm

3.2 气液两相流动力学特性分析

控制管涵中充水流量分别为 2.25 m³/s、3.46 m³/s、4.56 m³/s、5.56 m³/s、6.72 m³/s、8.03 m³/s, 实时测量各通气孔的风速、风压, 管路沿线水压变化过程, 以及管道顶部气囊的长度、位置、移动速度。依据上述通气孔内气相的原型、模型相似性关系, 对模型结果进行换算, 得出如下结果。

(1) 通气孔风速与充水流量关系。充水流量越大, 各通气孔风速也越大, 最大风速值与充水流量近似线性相关(如表 2); 同一通气孔在不同充水流量下的排气过程相似(如图 2), 这表明充水流量一定的情况下, 各通气孔的排气过程取决于其管路特性; 充水过程中, 2 号通气孔下游正坡段内气体受急流段水流挟气影响, 有短暂的负压吸气过程; 充水完毕, 管道中大气囊的排出易引起风速波动和压力激增。

表 2 4 号通气孔最大风速与充水流量关系

Table 2 Relationship between the maximum wind speed and water-filling flow rate at 4# air vent

充水流量/(m³·s⁻¹)	2.25	3.46	4.56	5.56	6.72	8.03
与最小流量比	1.00	1.54	2.03	2.47	2.99	3.57
最大风速/(m·s⁻¹)	4.96	7.13	9.35	11.38	12.57	16.32
与风速最小值比	1.00	1.44	1.89	2.29	2.53	3.29

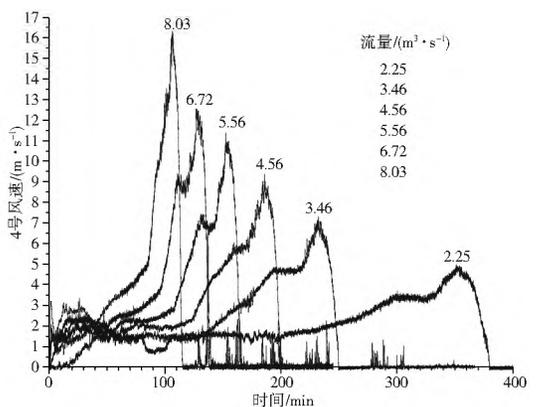


图 2 不同充水流量下 4 号通气孔风速过程

Fig. 2 Wind speeds under different water filling flow rates at 4# air vent

(2) 通气孔风速与风压的关系。通气孔风速与风压有很好的线性相关性(如图 3),由通气孔风速与风压测量值可得通气孔的流量系数约为 0.80;当原型充水流量小于 4.5 m³/s (平均满管流速 0.36 m/s),全线通气孔排气速度小于 60 m/s,最大空气密度变化小于 1.49%,通气孔内气体的压缩性可以忽略,视为不可压缩流体,这也说明相似律推导中的假设合理。

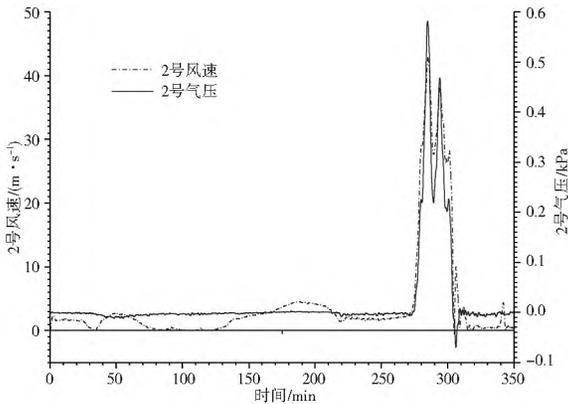


图 3 2 号通气孔风速与风压

Fig. 3 Wind speed and wind pressure at 2# air vent

(3) 管道内气囊的变化、运动规律。当无量纲水深 y/D (y 为水深, D 为管道内径) 介于 0.82~1.0 之间时,水流在自由水面流和有压流之间的往复波动是管道中气囊形成的诱因^[20];缓坡管段滞留气囊较多,陡坡管段滞留气囊较少,说明较大坡度有利于气囊的移动和排出,当管道坡度大于 3.5‰时,几乎没有积存气囊;模型缓坡管道中气泡移动速度与液相断面平均流速呈线性相关,近似满足:

$$V_a = 0.6869V_w - 0.0682 \quad (13)$$

式中: V_a 为气泡移动速度; V_w 为液相断面平均流速。

此外,模型中缓坡段(顺坡段 $i = -1‰$ 和逆坡段 $i = 0.2‰$)气囊启动的临界弗汝德数 F_{cr} 为 0.34,与 Lauchlan 等人^[21]给出的水平管道内临界弗氏数 F_{cr} 的下限值 0.35 相接近,原型中最大输水流量 17.5 m³/s,相应弗汝德数 F_{cr} 仅为 0.22。因此,实际工程运行中管道内将不可避免地滞留气囊。

(4) 管道内滞留气囊对输水效率的影响。根据表 3 中设计工况下各通气孔附近原、模型气囊几何比尺关系可知:模型中气囊的体积压缩率仅为 1%~3%,对应原型中气囊的体积压缩率则为 19%~36%,原型中气囊的体积压缩率远大于模型中气囊的体积压缩率;原、模型气囊的体积比尺介于 3.090~3.787,长度比尺介于 14.56~15.59,小于水流的体积比尺 4.630 和长度比尺 16.67。模型试验中,有气囊工况下管路水头损失系数的最大增幅约为无气囊工况下的 2.14%,输水流量降低约 1.07%。由原、模型气囊的几何关系知,原型中滞留气囊引起的管内壁相对粗糙度小于模型中气囊引起的相对粗糙度,且原型雷诺数 Re 远大于模型值(原型中设计流量 15 m³/s 时 Re 为 4.73×10^6 ,对应模型 Re 仅为 6.95×10^4),因此,原型滞留气囊对管路输水能力的影响更小,在工程实际运行中可忽略。

表 3 原型、模型气囊的几何比尺关系

Table 3 Geometric proportion relationship of detained air bubbles in the prototype and model

位置	原型			模型			$\frac{V_p}{V_m}$	$\frac{L_{ap}}{L_{am}}$
	水压 / m 水头	绝对压 强/ Pa	λ_p (%)	水压 / m 水头	绝对压 强/ Pa	λ_m (%)		
1 号	6.972	169 651	31	0.418	105 421	3	3 293	14.88
2 号	3.637	136 968	19	0.218	103 461	1	3 787	15.59
3 号	7.853	178 284	33	0.471	105 941	3	3 190	14.72
4 号	8.526	184 880	35	0.512	106 343	3	3 116	14.61
5 号	8.779	187 359	36	0.527	106 490	3	3 090	14.56
6 号	7.370	173 551	32	0.442	105 657	3	3 245	14.81
7 号	6.555	165 564	30	0.393	105 176	3	3 346	14.96

(5) 暗涵合理的充水流量特点。暗涵充水流量应小于 4.0 m³/s(断面平均流速 0.318 m/s),过大充水流量将引起部分通气孔在排气过程中产生风啸,甚至冒水。

4 结论

(1) 基于量纲分析和相似理论,从引起通气孔内气体压强变化的动力因素入手,推导了管道充水-通气孔排气过程中气流的动力相似律,结果表明,充水过程中,由于水流填充而引起的通气孔排气过程的气相动力相似律可近似采用液相的重力相似律。

(2) 基于气体热力学原理,通过对充水过程中气液两相流特点的分析,建立了原型、模型管道中滞留气囊的几何比尺关系,为评估滞留气囊对输水能力的影响提供了理论依据。

(3) 依据上述理论,结合北京西四环暗涵管道充水试验,对管道缓慢充水过程中气液两相流动力学特性进行测量、分析后得出,合理的充水流量应小于 4.0 m³/s(平均满管流速 0.318 m/s)。基于模型中滞留气囊对输水能力影响的定量测量结果(有气囊条件下模型输水流量降低小于 1.07%),结合原、模型气囊几何比尺关系,认为原型中滞留气囊对输水能力的影响小于模型值,实际工程运行中可忽略。

参考文献(References):

- [1] Zhou F, Hicks F E, Steffler P M. Analysis of Effects of Air Pocket on Hydraulic Failure of Urban Drainage Infrastructure [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(1): 86-94.
- [2] Zhou F, Hicks F E, Steffler P M. Transient Flow in a Rapidly Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(6): 625-634.
- [3] Zhou F, Hicks F, Steffler P. Effects of Trapped Air during Rapid Filling of Partially [A]. Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering [C]. Montreal, Quebec, Canada, 2002.
- [4] Zhou F, Hicks F E, Steffler P M. Observations of Air Water Interaction in a Rapidly Filling Horizontal Pipe [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(6): 635-639.
- [5] Vasconcelos G J, Wright J S, Guizani M. Experimental Investigations on Rapid Filling of Empty Pipelines [R]. Department of

- Civil and Environmental Engineering, University of Michigan: Michigan, 2005.
- [6] AWWA. Concrete Pressure Pipe[M]. USA: AWWA, 1995.
- [7] Henry T F. Air water Flow in Hydraulic Structures[M]. Denver Colorado: United States Department of the Interior.
- [8] 杨开林, 时启燧, 董兴林. 引黄入晋输水工程充水过程的数值模拟及泵站充水泵的选择[J]. 水利学报, 2000, (5): 76-80 (YANG Kai lin, SHI Qi sui, DONG Xing lin. Numerical simulation of the filling process for Wanjiazhai Diversion Project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (5): 76-80 (in Chinese))
- [9] 杨敏, 李强, 李琳, 等. 有压管道充水过程数值模拟[J]. 水利学报, 2007, 38(2): 171-175. (YANG Min, LI Qiang, LI Lin, et al. Numerical Simulation of Water filling Process in Pressure Conduit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(2): 171-175. (in Chinese))
- [10] 曹命凯, 郑源, 严继松, 等. 长距离有压输水管道充水过程的研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(12): 54-57. (CAO Ming kai, ZHENG Yuan, YAN Ji song, et al. Research on Pressure Pipeline Water Filling Process in Long Distance [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 26(12): 54-57 (in Chinese))
- [11] SL 155-2012, 水工常规模型试验规程[S]. (SL 155-2011, Test Regulation for Normal Hydraulic Model [S]. (in Chinese))
- [12] SL 162-95, 水电站有压引水系统模型试验规程[S]. (SL 162-95 Test Regulation for Special Hydraulic Model Hydropower Pressurized Water Diversion System [S]. (in Chinese))
- [13] 夏毓常. 水力计算论文集[M]. 中国水利水电出版社, 1997. (XIA Yu chang, Proceedings of Hydraulic calculation [M]. China Waterpower Press. 1997. (in Chinese))
- [14] 夏毓常, 张黎明. 水工水力学原型观测与模型试验[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (XIA Yu chang, ZHANG Li ming. Prototype Observation and Model Test of the Hydraulics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [15] 南京水利科学研究所, 水利水电科学研究院. 水工模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985. (Nanjing Hydraulic Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Hydraulic Physical Modelling [M]. Beijing: China WaterPower Press. 1985. (in Chinese))
- [16] SL 74-95, 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. (SL 74-95, Specification for design of steel gate in hydraulic and hydroelectric engineering [S]. (in Chinese))
- [17] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982. (WU Wang yi. Hydromechanics [M]. Beijing: Beijing University Press, 1982. (in Chinese))
- [18] Wylie E B, Streeter V L. Fluid Transients [M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1978.
- [19] 杨开林. 电站与泵站中的水力瞬变及调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (YANG Kai lin. Hydraulic Transients and Regulation in Power Plants and Pumping Stations [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))
- [20] Vasconcelos J G, Wright S J, Guizani M. Experimental Investigations on Rapid Filling of Empty Pipelines [R]. Report UM-CEE-05-01, University of Michigan, 2005.
- [21] Lauchlan C S, Escarameia M. et al. Air in Pipelines [R]. HR Wallingford, Report SR 649. 2005.

(上接第64页)

(2) 裂缝产生后, 将进一步改变坝体的温度场, 在今后运行过程中, 若再次遭遇大幅温降的不利工况, 裂缝可能向坝体内部继续发展, 导致坝体承载能力下降, 危害大坝的运行安全。

(3) 目前该水库已评定为“三类坝”, 建议加固处理时, 应针对性地采取保温措施, 以避免裂缝进一步发展。

参考文献(References):

- [1] 宋恩来. 温度作用对运行期混凝土坝的影响[J]. 大坝与安全, 2003, (2): 16-18. (SONG En lai. Temperature Effect on Concrete Dam during Operation [J]. Dam & Safety, 2003, (2): 16-18. (in Chinese))
- [2] 朱伯芳. 建设高质量永不裂缝拱坝的可行性及实现策略[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1155-1162. (ZHU Bo fang. On the Feasibility of Building High Quality Arch Dams without Cracking and the Relevant Techniques [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1155-1162. (in Chinese))
- [3] 朱伯芳. 混凝土拱坝运行期裂缝与永久保温[J]. 水利发电, 2006, 32(8): 21-24. (ZHU Bo fang. On Permanent Superficial Thermal Insulation of Concrete Arch Dams [J]. Water Power, 2006, 32(8): 21-24. (in Chinese))
- [4] 马福恒, 李子阳, 戴群. 河南省石漫滩水库大坝安全综合评价报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012. (MA Fu heng, LI Zi yang, DAI Qun. Comprehensive Safety Assessment Report of Shimantan Reservoir Dam in Henan Province [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [5] 马福恒, 沈振中, 袁自立. 河南省石漫滩水库大坝原型观测资料分析报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012. (MA Fu heng, SHEN Zhen zhong, YUAN Zi li. Analysis Report of in situ Monitoring Data of Shimantan Reservoir Dam in Henan Province [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [6] 李子阳, 马福恒, 沈振中. 河南省石漫滩水库大坝结构性能安全评价报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2012. (LI Zi yang, MA Fu heng, SHEN Zhen zhong. Safety Assessment Report of Structural Performance of Shimantan Reservoir Dam in Henan Province [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [7] 邓仕涛. 基于ANSYS的丹江口大坝加高结构性能及温度应力研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (DENG Shi tao. Study on Structural Behavior and Thermal Stress of Heightening of Danjiangkou Dam on ANSYS [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [8] SLT 191-96, 水工混凝土结构设计规范[S]. (SLT 191-96, Design Code for Hydraulic Concrete Structures [S]. (in Chinese))