

Research on the Applied Technology of Variable Angular Velocity Rotating Jet Grouting Cut-Off Wall

Zhanyong Yao¹, Jialei Li², Zhaojun Wang³, Wenbao Chen⁴, Hongwei Zhang⁴, Guangquan Zhou⁵, Xu Wang¹

¹School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

²Engineering Research Institute of Appraisal and Strengthening, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

³Shandong Provincial Airport Management Group Co., Ltd., Jinan Shandong

⁴Beijing Municipal Fourth Construction Engineering Co., Ltd., Beijing

⁵Shandong Machinery Construction Co., Ltd., Jinan Shandong

Email: zhanyong-y@sdu.edu.cn

Received: Jan. 24th, 2020; accepted: Feb. 10th, 2020; published: Feb. 17th, 2020

Abstract

To solve the problems of a larger thickness of diaphragm wall and a smaller hole spacing with traditional high pressure jet grouting method, a high pressure rotary jet method with variable angular velocity was developed and the test of high pressure rotary jet grouting with variable angular velocity in silty soil, silty clay/clay and sandy soils was carried out. The process parameters of this method were obtained through laboratory and field tests and the engineering effect of the rotary jet with variable angular velocity was also verified. The results show that the rotating jet grouting pile with approximately rectangular section can be ejected out by the secondary stage of rotational spray angular velocity within the 360-degree. Similar rectangular piles of 0.5 m × 1.4 m~1.6 m, 0.3 m × 1.6 m, 0.4 m × 1.4 m~1.6 m can be jetted out in setting process parameters in the formations which mainly consist of silty soil, silty clay/clay, sandy loam stratum, respectively. Compared with the traditional high-pressure rotary injection technology with fixed angular velocity, this method has two notable features: the thickness of diaphragm wall is reduced and hole spacing for jet grouting piles is increased by more than 1 times, which can reduce the project cost by about 50% and improve the construction efficiency by approximately 1 time. Compared with jet-grouted cutoff wall methods, the high-pressure jet grouting method has characteristics of uniform thickness of diaphragm wall, high strength, and good seepage proof property.

Keywords

High-Pressure Rotating Jet Grouting, Rotating Jet Grouting Cut-Off Wall, Grouting Pipe, Variable Angular Velocity

变角速度旋喷防渗墙应用技术研究

姚占勇¹, 李家磊², 王兆军³, 陈文宝⁴, 张宏伟⁴, 周广泉⁵, 王旭¹

¹山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

²山东建大工程鉴定加固研究院, 山东 济南

³山东省机场管理集团有限公司, 山东 济南

⁴北京市市政四建设工程有限责任公司, 北京

⁵山东省机械施工有限公司, 山东 济南

Email: zhanyong-y@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年1月24日; 录用日期: 2020年2月10日; 发布日期: 2020年2月17日

摘要

为了解决传统的高压旋喷防渗墙成墙厚度偏大、钻孔间距较小的工程问题, 研发了一种变角速度高压旋喷技术, 开展了粉土、粉质黏土/黏土、沙壤土三种地层条件下的变角速度高压旋喷防渗墙试验, 通过室内试验和现场试验, 获得了变角速高压旋喷防渗墙工艺参数, 验证了变角速度旋喷工程效果。结果表明, 采用360°范围内旋喷角速度的2级变速, 可喷射出近似矩形断面的旋喷桩体; 在粉土、粉质黏土/黏土、砂壤土地层和设定的工艺参数下, 可分别喷射出0.5 m × 1.4 m~1.6 m、0.3 m × 1.6 m、0.4 m × 1.4 m~1.6 m的近似矩形桩体; 较传统的定角速度高压旋喷技术相比, 成墙厚度降低, 旋喷桩布孔间距增加1倍以上, 可降低工程造价50%左右, 施工工效提高约1倍左右; 与摆喷防渗墙相比, 墙体厚度均匀、抗变形能力强、防渗效果好。

关键词

高压旋喷, 旋喷防渗墙, 注浆管, 变角速度

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地下水渗漏是隧道、地下管廊、深基坑等地下工程和水利工程失稳的主要原因之一, 设置防渗墙是解决上述工程地下水渗透、保证结构稳定性的主要工程措施。目前常用的防渗墙施工主要有高压旋喷、多头深层搅拌水泥土、锯槽法、链斗法、薄型抓斗、射水法和倒挂井法等成墙工艺。高压旋喷技术是我国上世纪70年代引进的地基处理技术, 主要用于软弱地基处理加固、水利工程防渗等。该技术一般采用钻机造孔, 利用钻机或台车把带有喷嘴的注浆管置于钻孔内预定的位置, 通过高压泵使浆液或水以30 MPa以上的高压从喷嘴中喷射冲击切割土体, 同时注浆管以一定速度旋转(摆动或不旋转)并向上提升, 将浆液与土颗粒强制掺搅混合, 在土中形成有一定强度的凝结体。高压旋喷具有成墙质量可靠、设备轻便灵活等技术特点, 在防渗工程中应用广泛。但普通高压旋喷防渗墙技术具有成墙厚度大、钻孔间距较

小、水泥用量大、工程造价高、施工效率较低等工程问题。因此,研发成墙厚度小、桩间距大的高压旋喷桩工程技术,对于提高高压旋喷防渗墙施工效率、节约工程材料、降低工程费用具有重要的社会和经济意义。

为了提高高压旋喷防渗墙工程质量和防渗效果,解决工程造价偏高、施工效率偏低等问题,近年来国内外学者和工程技术人员针对高压旋喷防渗墙工程技术、浆液材料、防渗机理与防渗效果等开展了大量研究[1][2]。在浆液材料方面,相关研究主要集中于材料特性分析、材料方案优化、工业固废利用以及防渗机理的研究[3][4][5][6]。在高压旋喷防渗墙设计方案、施工技术方面,主要开展了特殊地层、特殊环境下防渗墙设计方案、工艺参数等方面的优化[7][8][9]。为了解决高压旋喷防渗墙成墙厚度偏大、工程造价偏高、施工效率偏低等工程问题,研究提出喷管提升过程中仅沿防渗墙方向喷射而不旋转的高压定喷工艺,和喷管提升过程中沿防渗墙方向按一定角度的定速旋转喷射的高压摆喷技术。由于定喷工艺形成的防渗墙体过薄,防渗较差效果,目前已经基本不再使用,近年来针对摆喷防渗技术方面的应用研究相对较多。王其升、常明云、叶勇等[10][11][12]针对不同的地层条件分别开展了高压摆喷防渗技术试验,通过试验优化了施工工艺和相关工艺、技术参数,验证了高压摆喷防渗墙的技术效果;张民庆、邓海忠、陈永贵、卢立新等[13][14][15][16]依托不同防渗工程分别开展了注浆与摆喷复合式截水帷幕、不对称高压摆喷防渗、折摆型摆喷防渗和振孔高压摆喷等试验,解决了特殊部位防渗结构衔接问题,提高了防渗效果和施工效率。高压摆喷工艺尽管在防渗墙方向形成了一定的扇面体结构,能做出较长的单幅墙段,但在靠近喷射孔处所形成的墙体仍然太薄,其抗变形能力、可靠性差,特别是对变形较为敏感的基坑防渗墙工程,会因边坡不可避免的变形而导致墙身破裂发生漏水事故;在高水头作用下也易导致较薄部位的墙体破坏防渗失效。郑全明[17]通过现场围井试验对比分析了高压旋喷和高压摆喷防渗技术在砂土地层中的处理效果,证明了高压摆喷因喷射孔处墙体偏薄防渗效果较差的问题。由上可见,尽管国内外在高压旋喷、定喷防渗墙方面开展了大量研究,但传统的高压旋喷工艺防渗墙成墙厚度过大、施工效率偏低、工程费用偏高,定喷、摆喷工艺整体或局部墙体偏薄、易防渗失效的问题并未得到有效的解决。

本文研发了一种变角速度高压旋喷(简称“变喷”)技术,采用该技术,可以施工出矩形、十字形等各种异型高压旋喷桩;研发了相关施工装备,采用矩形墙体工艺控制,开展了粉土、粉质黏土、砂壤土三种地层条件下的高压变喷防渗墙现场试验,并通过试验提出了相关工艺参数。试验表明,变角速度高压旋喷可大大降低防渗墙的成墙厚度且墙体厚度均匀,显著加大旋喷桩钻孔间距。与传统的高压旋喷防渗墙相比,施工效率提高大大提高,工程费用降低约 50%,社会经济效益显著。

2. 技术与装备原理

传统高压旋喷技术的旋喷管采用固定的角速度在平面 360° 范围内匀速旋转,在注浆管匀速提升条件下,通过高压射流切割搅拌土体形成圆柱形凝结体。

基于射流理论,射流对土质结构均匀土层的作用半径与射流的作用时间呈正比关系,对固定方向土体的射流作用时间越长、喷射半径越大;反之,喷射半径就降低。当射流压力、流量、喷管提升速度不变时,将 360° 的匀速旋转调整为变角速旋转,可以通过不同方向旋转角速度的控制实现不同部位喷射时间的控制,以达到不同方向喷射半径变化,实现不同形态断面—如椭圆形、矩形、十字形等不同异形断面桩体的喷射。以矩形断面桩体为例,旋喷时在垂直于墙体轴线的方向和平行于防渗墙轴线方向采用不同的旋转速度,通过控制 2 个方向的旋转角速度比,即可以形成不同尺度的近似矩形断面的扁平桩体,从而降低墙体厚度,加大钻孔间距。

变角速度旋喷防渗墙施工是基于变角速动力头实现的,该动力头由传动减速装置、大惯量伺服电机、PLC 程序控制器和位于动力头上的位置传感器组成,能驱动旋喷管在 360° 平面范围内做任意变角速旋转

运动。可通过触摸屏选择工作模式，以及对不同的工作模式下的变角速参数进行设定，使水泥土固结体形成扁平板、十字等不同形状。

变喷防渗墙的单幅断面形状，可根据工程要求设计成矩形(板墙状)、椭圆形、十字形等异形性状，如图 1 所示。图中的 a、b 型可广泛用于深基坑支护工程的防渗墙、支护桩间止水，边坡挡水、挡土，地铁工程的土层加固或防水、水库大坝、海堤、江河堤防、坝体坝基防渗加固，构筑地下水库截渗坝等工程；c 型模式因十字形水泥土桩的比表面积大，可用于建筑、路基等软土地基的加固；d 型可在中间圆桩部位插入工字钢等型钢用于 SMW 工法。

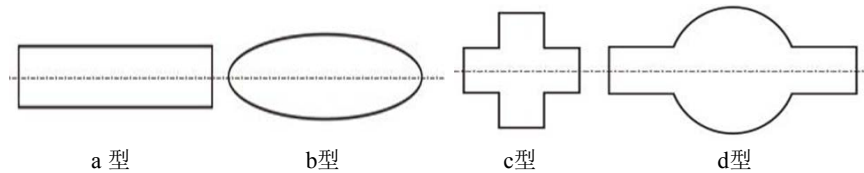


Figure 1. Sectional form of cut-off wall controlled by PLC program
图 1. 通过 PLC 程序控制可设定的变喷防渗墙断面形式

装备采用可实现 0~3000 r/min 的大惯量伺服电机。矩形断面角速度变化按 2 级控制，在防渗墙轴线方向左右 20° 范围内采用较低角速度 ω_1 ，在其它方向采用较大角速度 ω_2 (如图 2)，图 2 所示 4 个位置传感器用于速度变化的位置控制。通过控制变角速度之比 n ($n = \omega_2/\omega_1$) 实现矩形长宽比控制，转速比 n 越大，矩形断面长宽比越大，在一定防渗墙控制厚度条件下的施工效率就越高。但考虑电机与传动系统的可靠性， n 值也不宜过大。通过室内试验，最大转速比 n 为 20。转速比 n 超过 20，电机负荷变化过大且传动系统运行不稳定。

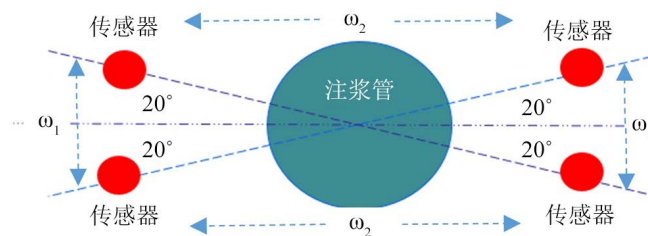


Figure 2. Schematic of angular velocity control for a rectangular section
图 2. 矩形断面角速度控制示意图

3. 现场试验

3.1. 粉土地层变喷防渗墙试验

1) 依托工程概况

试验依托济南新旧动能转换先行引爆区纵二路市政道路地下管廊工程。工程位于济南市新旧动能转换先行引爆区内，规划市政道路全长 1.145 km、道路总宽度 42 m。项目地处济南黄河以北平原地区，地形地貌特征为黄河冲积平原，地势低平。海拔高程一般在 20~30 m 之间。在支护深度范围的地层结构主要为黄河冲淤积粉土，局部夹薄层黏土/粉质黏土。粉土呈黄褐色，松散~稍密，湿~很湿，摇震反应迅速，土质较均匀，局部含有黏粒、砂粒，切面无光泽，韧性、干强度低。

2) 支护体系设计方案

原设计采用支护结构体系, 为防渗帷幕加支护方案。双拼 45c 工字钢围檩, $\Phi 609 \times 16$ 钢管内支撑, 开挖面两侧均设 400 mm 厚 C20 底板换撑带, 宽度为 1 m。支护桩为 $\Phi 800 \text{ mm} @ 1400 \text{ mm}$ (桩径 800 mm, 桩间距 1400 mm) 钻孔灌注桩, 三管法旋喷桩 $\Phi 600 \text{ mm} @ 450 \text{ mm}$, 施工总长度为 625 m。

3) 变角速度旋喷防渗墙试验

为了提供变角速度旋喷设计依据, 现场进行单桩变角速度旋喷试验。经过试验, 确定相关工艺参数如表 1 所示。

Table 1. Rotary jet grouting parameters for the Zong-er municipal road underground pipe corridor project
表 1. 纵二路市政道路地下管廊工程变喷工艺参数

土质条件	射流参数			角速度与提升速度参数			
	水压(MPa)/ 流量(l/min)	浆压(MPa)/ 流量(l/min)	气压(MPa)/ 流量(m ³ /min)	最高转速 r/min	最低转速 r/min	转速比	提升速度 (cm/min)
粉土	38/75	0.5/60	0.7/1	2600~2800	160~200	14~16	15

变喷试验桩体开挖如图 3 所示。检测表明, 单幅墙体断面近似呈长方形, 厚度为 0.5 m 左右, 长度为 1.4~1.6 m。根据变角速度试喷情况, 将该工程防渗墙施工由普通高压旋喷调整为变角速度旋喷, 喷孔间距为 1.2 m, 较设计的高压旋喷防渗墙孔间距 0.45 m 增加了 1.7 倍; 水泥消耗量约为 360 kg/m, 采用 42.5 号普通硅酸盐水泥, 水灰比为 1, 密度为 16 kN/m³, 水泥土强度不低于 1.5 MPa。采用三管法工艺施工, 最高与最低角速度比为 16, 其它工艺参数如表 1。变喷防渗墙使钻孔数量从原设计的 1389 个减为 520 个, 直接节省水泥 2400 余吨。经后期开挖验证, 工程质量满足设计要求。



(a) 开挖的试验段

(b) 变喷试验单桩开挖后的情况

Figure 3. Rotary jet grouting test for the Zong-er municipal road underground pipe corridor project
图 3. 纵二路市政道路地下管廊工程变喷试验

3.2. 粉质黏土、黏土地层变喷防渗墙试验

1) 依托工程概况

试验依托济宁市中心城区车站西路升级改造综合管廊支护工程。项目位于济宁市任城区, 沿现有车站西路, 东起车站西路与建设路交汇路口, 西至八里店大桥, 总长度 3250 m。场内地层主要为第四系冲、洪积堆积物, 钻探揭露地层为 6 层, 自上而下依次为粘性土, 黄褐~黑褐色, 土质不均匀, 厚度 1.00~2.80 m, 平均 1.58 m; 粉质黏土, 黄褐色, 可塑, 中等干强度, 厚度 0.40~4.10 m, 平均 1.72 m; 黏土, 灰褐色, 硬塑, 局部可塑, 高干强度, 高韧性, 切面有光泽, 含少量有机质, 厚度 0.60~4.90 m, 平均 2.77 m; 粉质粘土, 黄褐~灰黄色, 可塑~硬塑, 中等干强度, 中等韧性, 厚度 1.50~7.00 m, 平均 5.45 m; 黏土:

灰褐色，硬塑，高干强度，高韧性，切面有光泽，厚度 3.70~5.80 m，平均 4.75 m；粉质黏土，灰褐色，硬塑，中等干强度，中等韧性，该层未穿透。勘察期间测得地下水静止水位平均埋深 6.87 m。

2) 支护体系设计方案

原支护设计为支护桩加防渗帷幕方案，设计支护桩 $\Phi 600 \text{ mm} @ 1400 \text{ mm}$ ，桩长 14 m~16 m；防渗墙设计为旋喷桩 $\Phi 800 \text{ mm}$ 、搭接 200 mm、深度为 15 m。

3) 变角速度旋喷防渗墙试验

通过单桩变角速度旋喷试验，优化的相关工艺参数如表 2。

Table 2. Rotary jet grouting parameters for the Station west road upgrade comprehensive pipe corridor support project
表 2. 车站西路升级改造综合管廊支护工程变喷工艺参数

土质条件	射流参数			角速度与提升速度参数			
	水压(MPa)/ 流量(l/min)	浆压(MPa)/ 流量(l/min)	气压(MPa)/ 流量(m ³ /min)	最高转速 r/min	最低转速 r/min	转速比	提升速度 (cm/min)
粉质粘土/黏土	38/75	0.5/60	0.7/1	2600~2800	160~200	14~16	15

单桩变喷试验桩体开挖如图 4 所示。检测表明，单幅墙体平面近似呈长方形，在粉质黏土、黏土层中的成墙厚度约为 0.3 m，长度约为 1.6 m。根据试喷结果，确定喷孔间距为 1.2 m，较设计孔间距 0.6 m 增加了 1 倍；水泥掺入量为 320 kg/m，采用 42.5 号普通硅酸盐水泥，水灰比为 1，密度为 16 kN/m³，水泥石强度不低于 1.2 MPa。采用三管法工艺施工，采用三管法工艺施工，最高与最低角速度比为 16，其它工艺参数如表 2。采用变喷施工长度为 1200 m，钻孔数量从 2000 个减少到 1000 个，该工程共节省约 1300 吨水泥，其工程量减少一半，大大加快了施工进度。



Figure 4. The condition after the excavation of the test section of the comprehensive pipe corridor of Jining station west road

图 4. 济宁车站西路综合管廊变喷试验段开挖后的情况

3.3. 砂壤土地层变喷防渗墙试验

1) 依托工程概况

试验依托泰安市高新区罗石沟水库坝体除险加固工程。该项目位于泰安高新区天宝镇松棚村。坝体土质主要为砂壤土。该防渗墙长 150 m、深 15 m。原设计采用摆喷施工，折线形式搭接，摆喷中心线与

防渗板墙中心轴线夹角 21° ，设计要求成墙的有效厚度不小于 20 cm，最小墙厚不小于 12 cm，墙体渗透系数 $k \leq 10^{-6}$ cm/s，水泥渗入量为 300 kg/m，设计喷孔中心距为 1.4 m。

2) 变角速度旋喷防渗墙试验

通过单桩变角速度旋喷试验，优化的相关工艺参数如表 3。

Table 3. Rotary jet grouting parameters for the dam reinforcement project in Shigou Reservoir

表 3. 石沟水库坝体除险加固工程变喷工艺参数

土质条件	射流参数			角速度与提升速度参数			
	水压(MPa)/ 流量(l/min)	浆压(MPa)/ 流量(l/min)	气压(MPa)/ 流量(m ³ /min)	最高转速 r/min	最低转速 r/min	转速比	提升速度 (cm/min)
砂壤土	38/75	0.5/60	0.7/1	2600~2800	160~200	14~16	15

单桩变喷试验桩体开挖如图 5 所示。单幅墙体平面近似呈长方形，在砂壤土层中的成墙厚度约为 0.4 m，形成的单幅墙段长 1.5 m~1.6 m。为保证防渗效果，将该工程摆喷工艺调整为变角速度旋喷工艺。根据试喷结果，喷孔间距采用 1.2 m，转速比采用 16，其它工艺参数如表 3，共施工防渗墙 2250 m²。检测表明，变喷工艺成墙厚度均匀，断面优于摆喷，可有效解决喷射孔附近墙体薄、抗变形能力低、防渗可靠性差等问题。



Figure 5. The condition after the excavation of the test section of the Taian Luo Dam reinforcement project

图 5. 泰安罗石沟水坝除险加固工程变喷试验单桩开挖后的情况

4. 主要结论

1) 基于高压旋喷的作用半径与射流作用时间正相关原理研发的变角速度旋喷技术，可以实现异形桩的喷射。

2) 采用 360° 范围内旋喷角速度的 2 级变速，可喷射出近似矩形断面的旋喷桩体；在试验设备条件下，2 级变速的最大速比为 $n = 20$ 。

3) 现场试验表明，在粉土、粉质黏土/黏土、砂壤土地层条件下，变角速度旋喷在设定的工艺参数下可分别喷射出 $0.5 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \sim 1.6 \text{ m}$ 、 $0.3 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 、 $0.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \sim 1.6 \text{ m}$ 的近似矩形桩体。

4) 与传统的定角速度高压旋喷技术相比，变角速度旋喷能有效降低防渗墙的成墙厚度，可节省大量的水泥；旋喷桩布孔间距提高 1 倍以上，可降低工程造价 50% 左右，施工工效提高约 1 倍左右。与摆喷

相比, 成墙厚度均匀, 墙体抗变形能力强, 防渗效果可靠。

参考文献

- [1] 曹宏德. 高喷防渗技术的进展[J]. 水利水电技术, 2001, 32(1): 63-64.
- [2] 沈振中, 邱莉婷, 周华雷. 深厚覆盖层上土石坝防渗技术研究进展[J]. 水利水电技术科技进展, 2015, 35(5): 27-35.
- [3] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549-554.
- [4] 张明飞, 童立元, 郑灿秋, 程亮. 工业废渣用于地下工程止水帷幕的试验[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(9): 19-29.
- [5] Chao, Y., Song, Y.L. and Yong, F.D. (2015) Experimental Research for the Application of Mining Waste in the Application of Mining Waste in the Trench Cutting Remixing Deep Wall Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, Article ID: 202848. <https://doi.org/10.1155/2015/202848>
- [6] 曲兆昆, 王华敬, 寻万福. 基于压汞法的改良土渗透特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 172-178.
- [7] 杨震. 高压喷射注浆法防渗加固机理与施工技术应用研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [8] 周红丽. 止水帷幕在高层建筑深基坑中的应用[J]. 岩土力学, 2003, 10(增刊): 103-104.
- [9] 文家海, 姜命强. 防渗墙建造的高压旋喷工法及质量控制[J]. 水力水电发电学报, 2008, 27(2): 89-92.
- [10] 王其升. 高压摆喷灌浆技术在围堰防渗中的应用[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(增 1): 5248-5252.
- [11] 常明云, 赵明, 魏秀秀. 强透水砂卵石复杂地层的高压旋摆喷灌浆处理技术[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1409-1403.
- [12] 叶勇, 黄江林, 张建龙. 120°角三重管高压摆喷桩施工技术[J]. 水利与建筑工程学报, 2004, 2(3): 55-57.
- [13] 张民庆, 江玉华, 郭小华. 以太广场沉降分析与复合式截水帷幕施工技术[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(15): 2647-2651.
- [14] 邓海忠, 张建华. 不对称高压摆喷灌浆试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, 3: 94-99.
- [15] 陈永贵, 张可能, 魏忠超, 杨荣丰. 酸性污水库坝渗流稳定性分析及防渗加固处理[J]. 中南大学学报, 2006, 37(6): 1171-1176.
- [16] 卢立新, 陈更华, 王汉忠. 振孔高压摆喷技术在堤防加固中的应用[J]. 人民黄河, 2004, 26(9): 3-4.
- [17] 郑全明. 砂土地层中高压旋喷和摆喷防渗效果检验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(4): 654-656.