

白鹤滩水电站反拱型底板非线性静力分析

何小敏¹, 杨 敏¹, 董天松¹, 刘 鹏², 李 琳¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘 要: 基于非线性接触理论, 结合有限元分析方法对弦长达 130 m、分块较多的反拱底板水垫塘进行敏感性分析, 研究正向荷载作用下不同锚固水平和方式、反拱曲率及键槽对反拱水垫塘稳定性的影响。并得出以下结论: 锚筋对反拱形底板的整体稳定起关键性作用; 均布荷载作用下锚筋均匀分布最利于整体稳定, 中间板块不锚固是可以选择的利于成拱的方式; 对于弦长达 130 m 的反拱水垫塘, 反拱圆心角 74° 左右较合理; 键槽对局部稳定性有明显提高。

关键词: 水垫塘; 反拱形底板; 稳定性; 非线性; 锚固; 反拱曲率; 键槽

中图分类号: TV314

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0040-05

Nonlinear stability analysis of the counter-arched slab for Baihetan hydropower project

HE Xiaomin¹, YANG Min¹, DONG Tiansong¹, LIU Peng², LI Lin¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the nonlinear contact theory, combined with finite element analysis method, this paper made sensitivity analysis of counter-arched slab whose chord length is 130 m and which has more than 9 blocks. It also studied the influence on the stability of the counter-arched slab under different anchor level and way, different reverse arch curvature and key groove. And it draw the following conclusion that anchor bar plays key role in counter-arched slab's overall stability; uniform anchor bar distribution is the most suitable way for the overall stability and intermediate plate without anchor bar can be selected as a good way; for reverse-arch-shaped water cushion pond whose chord length up to 130 m, the arch central angle about 74° is reasonable; the local stability has increased significantly by the influence of key groove.

Key words: plunge pool; counter-arched slab; stability; non-linear; anchoring level; reverse arch curvature; key groove

1 概 述

反拱形水垫塘是将底板做成反拱形, 利用拱形结构的力学特性将射流冲击荷载传递到两岸山体或拱座, 充分发挥混凝土的抗压特性和拱结构的超载能力, 提高底板的整体和局部稳定性。对于反拱形底板的稳定问题, 前人曾用三铰拱^[1]、两铰拱或无铰拱等力学模型对反拱形底板进行稳定性研究, 提出相应的稳定计算模式, 但他们或将衬砌块作为刚体, 或将块间连接简化为一种“铰”, 或将整个水垫塘结构看成一个无铰拱。实际上, 由于反拱形底板面积较大, 在施工过程中要设置施工缝等, 缝间设止水, 拱端与拱座之间设有止水铜片, 因此反拱形底板

结构并不是一个整体, 其受力过程表现为一种高度的非线性, 特别是在止水破坏后, 底板与底板、底板与基岩、底板与拱座之间相互碰撞、滑动, 表现为典型的高度非线性接触问题。对于反拱形底板非线性问题, 前人曾利用接触元处理底板与底板、底板与基岩间的接触, 弹簧单元模拟板块与基岩之间的锚固钢筋, 建立了二维接触有限元分析模型^[2]。马斌^[3-4]等基于粘结滑移、非线性接触理论提出一种适用于反拱底板结构体系的非线性耦合静动力分析方法, 通过有限元分析研究了板块的整体稳定性和局部稳定性与底板体型之间的关系。但前人的研究多是基于反拱弦长较小、板块数较少的反拱底板, 对于反拱弦长达 130 m、板块数多达 9 块的反拱水垫

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2012-10-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(51179119)

作者简介: 何小敏(1987-), 男, 江西樟树人, 硕士研究生, 从事水工水力学研究。

塘研究较少,本文以金沙江白鹤滩水电站反拱型水垫塘为研究背景,通过三维非线性接触有限元模型研究不同锚固水平、锚固方式以及反拱曲率对反拱型底板稳定性的影响。

水垫塘运行期间,底板止水在大多数情况下是完好的,在上表面水压力的作用下,板块间不能形成“拱”的作用。把促使板块形成“拱”作用的荷载称为正向荷载,与其相反作用的荷载称为反向荷载。反拱水垫塘底板的稳定性分为整体稳定性和局部稳定性,其整体稳定性就是拱座的稳定性^[5]。

2 有限元模拟方法

2.1 底板与基岩、混凝土(基岩)与钢筋之间的联接方式

底板与基岩、混凝土与钢筋之间的接触问题很复杂,非线性接触理论见文献[6]。采用 ANSYS 大型结构计算软件中的接触单元能够很好地模拟底板

与基岩之间的接触作用,底板与基岩之间的接触系数根据以往工程经验取 0.55,混凝土底板之间的接触取 0.5 较合适。

锚筋与混凝土(基岩)的联接,有以下几种方式:

(1) 固结。假定锚筋与混凝土(基岩)之间是完全固结的,没有任何相对变位,锚筋的应变等于它周围混凝土(基岩)的应变,见图 1。本文采用这种联结方式,钢筋单元(Rebar element)在程序运行时产生,同时产生约束函数(Constraint equation)实现钢筋与板块、基岩的连接,如图 2 所示。具体约束形式为:

$$U_k = \sum_j \beta_j U_j, \quad \sum_j \beta_j = 1$$

(2) 联接弹簧单元。如图 3 所示,在锚筋与混凝土(基岩)间设置联接单元,把锚筋与混凝土之间的接触力集中在一组弹簧上,锚筋表面与混凝土(基岩)之间的距离为零。

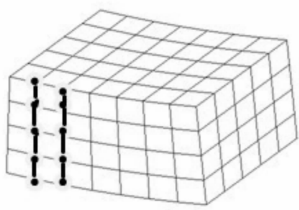


图1 固结联接

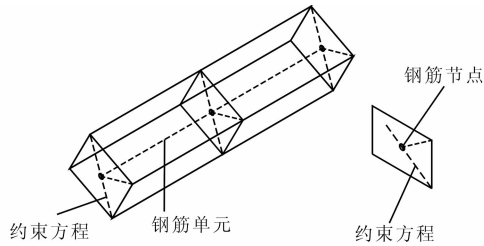


图2 钢筋单元

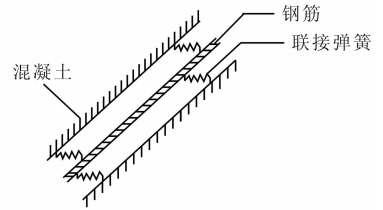


图3 弹簧联接

设切向弹簧常数为 k_h , 法向弹簧常数为 k_v , 在局部坐标系 (H, V) 中, 节点力与节点变位的关系为:

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} \bar{X}_i \\ \bar{Y}_i \\ \bar{X}_j \\ \bar{Y}_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_h & 0 & -k_h & 0 \\ 0 & k_v & 0 & -k_v \\ -k_h & 0 & k_h & 0 \\ 0 & -k_v & 0 & -k_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{u}_i \\ \bar{v}_i \\ \bar{u}_j \\ \bar{v}_j \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$= [\bar{k}^e] \{\bar{\delta}^e\}$$

式中: $\bar{k}^e$ 为局部坐标系中的刚度矩阵。进行坐标变换后, 得到整体坐标系 (x, y) 中的弹簧单元刚度矩阵如式(2):

$$[k^e] = [T]^T [\bar{k}^e] [T]$$

$$= \begin{bmatrix} k_h c^2 + k_v s^2 & k_h s c - k_v s c & -k_h c^2 - k_v s^2 & -k_h s c + k_v s c \\ & k_h s^2 + k_v c^2 & -k_h s c + k_v s c & -k_h s^2 - k_v c^2 \\ \text{对称} & & k_h c^2 + k_v s^2 & k_h s c - k_v s c \\ & & & k_h s^2 + k_v c^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $c = \cos\theta$, $s = \sin\theta$ 。

(3) 接触单元。在锚筋和混凝土(基岩)之间也可用接触单元, 如图 4 所示。在以上的 3 种联接方式中, 固结是最简单的。一般说来, 如果计算的目的

在于了解结构的承载能力和整体反应, 可以假定钢筋与混凝土(基岩)是固结的。如果需要了解裂缝开度、锚筋握裹力的分布等局部反应, 则必须采用接触单元或联接弹簧单元, 其中接触单元更好一些。

2.2 有限元模型

有限元模型如图 5 所示, 底板顺水流方向(Y 向)长度 15 m, 基岩厚取 40 m, 基岩宽取 45 m。板块、拱座、边坡、基岩间采用接触处理。板块、拱座为混凝土, 采用 SOLID65 单元模拟, 基岩为柱状节理玄武岩, 采用 SOLID45 单元。锚筋垂直于接触面均匀径向布置, 锚筋长度取 12 m(含底板内长度), 锚筋采用 LINK8 单元, 见图 6 所示。对基岩进行全约束, 板块、拱座及边坡没有顺水流方向位移。

3 正向荷载作用下有、无锚固对稳定性的影响

3.1 计算荷载的确定

计算取正常检修工况^[7], 水垫塘抽干, 底板止

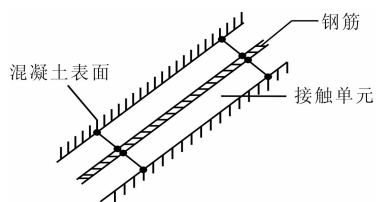


图4 接触联接

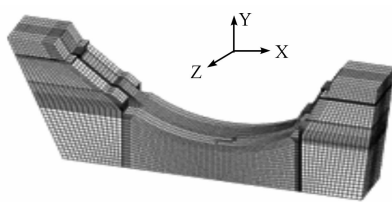


图5 反拱型水垫塘底板与锚筋接触模型

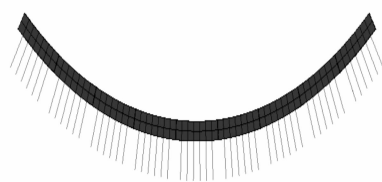


图6 反拱型水垫塘有限元计算模型

水完好。检修放空工况为最不利荷载组合,基本包括重力和扬压力。

板块下的扬压力 F_u , 包括渗透压力 F_a 和浮托力 F_b 。其中, 渗透压力 F_a 由水垫塘底板块下的渗流计算获得, 由下式给出:

$$F_a = \alpha \Delta H \gamma A \quad (3)$$

式中: ΔH 为上下游水位差; α 为渗流折减系数, 它与水垫塘底板下基岩的地质条件、帷幕和排水的布置形式有关。结合二滩等工程实际, 止水完好情况下扬压力不超过 100 kPa, 为便于分析, 扬压力分别取 250、200、180、150、120 和 100 kPa 进行分析。

3.2 结果分析

扬压力在 150 kPa 以下时, 锚筋都处于正常状态, 当扬压力为 180 kPa 时大部分锚固钢筋已经达到屈服, 导致拱端推力大幅增加, 见图 7、图 8。无锚固时, 扬压力每增加 1 kPa 拱端推力增长约 11.15 t/m。加锚筋(底板锚固量 6.2 t/m^2 、拱座锚固 4.3 t/m^2 , 边坡锚固 2.7 t/m^2)后, 钢筋屈服前, 扬压力每

增加 1 kPa 拱端推力增长约 2.28 t/m, 此时的拱端推力增长率为无锚固时的 20.48%; 而在钢筋屈服后, 扬压力每增加 1 kPa 拱端推力增长约 10.29 t/m, 拱端推力增长率为无锚固时的 92.34%, 基本上和无锚固时的增长率相同, 这是由于锚筋屈服后, 锚固力一直保持 6.2 t/m^2 不变, 其余力均由拱座承担。相同的扬压力下锚筋对反拱形底板的整体稳定起到了关键性作用。

4 钢筋锚固水平对拱端推力的影响

4.1 均匀锚固时不同锚固水平对拱端推力的影响

拱圈均匀锚固时, 当改变总锚固水平, 150 kPa 扬压力作用下会产生不同的拱端推力。随着锚固水平的增加, 拱端推力的降低趋势变缓, 板块、拱座的位移变小趋势也相应变缓。约锚固 6.2 t/m^2 后, 再增加锚固量, 拱端推力和板块、拱座位移变化不再显著, 如图 9~10 所示。由于拱座左端边坡较缓, 导致左、右拱座位移不一致。

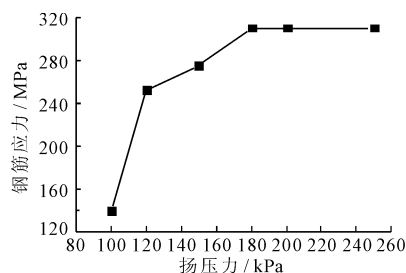


图7 钢筋应力最大值

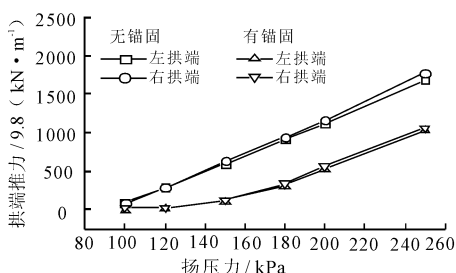


图8 拱端推力

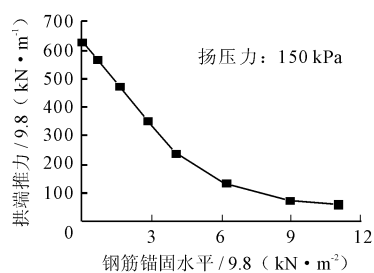


图9 拱端推力

4.2 钢筋总量不变时, 不同板块锚固水平对拱端推力的影响

保持同一拱圈上锚固钢筋总量不变, 锚固总量为各个板块均匀锚固 6.2 t/m^2 时的钢筋总量, 即单个拱圈的锚固量 $\sum_{i=1}^9 A_i$ 不变。 A_i 为拱圈第 i 块底板的锚固水平, 且 $A_i = A_{10-i}$, 如图 11 所示。

保持 $A_2 (= A_8) = A_4 (= A_6) = 6.2 \text{ t/m}^2$ 不变, 改变 $A_1 (= A_9)$ 、 $A_3 (= A_7)$ 与中间板块 A_5 之间锚固水平的相对关系, 并令 $A_3 = A_5$, 计算各种情况下的拱端推力及拱座、板块位移, 结果见表 1。

同一拱圈内锚固总量一定时, 当钢筋均匀锚固时, 扬压力作用下产生的拱端推力最小, 此时, 拱圈板块的最大位移也最小, 拱座 y 向位移为负主要由于拱座发生微小转动所致。同一拱圈内的不均匀锚固可能使个别板块位移加大, 从而增大拱端推力。因此, 从抵抗均匀(扬钢筋压力)荷载的角度来说, 应均匀分布, 使拱端推力最小, 有利于反拱水垫塘底板的整体稳定。

4.3 中间板块不锚固对拱端推力的影响

扬压力作用下, 拱圈中部板块位移较大, 若拱圈均匀锚固, 会限制板块中部位移, 这对于拱圈成拱影

响较大,不利于拱结构力学性能的发挥。因此考虑力、拱座位移等的影响,见表 2。

中间板块不锚固($A_5=0$ 、 $A_4\sim A_6=0$)情况对拱端推

表 1 同一拱圈锚固总量不变时,不同板块锚固水平下的拱端推力、拱座位移9.8 kN/m², 9.8 kN/m, mm

锚固水平		拱端推力		左拱座位移		右拱座位移		板块最大位移
A_1	$A_3=A_5$	左拱端	右拱端	X 向	Y 向	X 向	Y 向	
0	10.3	160.9	166.3	0.008	-0.022	-0.002	-0.441	7.438
2	9.0	126.1	132.9	0.014	-0.105	-0.041	-0.544	5.412
4	7.7	122.7	132.5	0.033	-0.168	-0.108	-0.642	3.215
6.2	6.2	121.5	130.3	0.043	-0.179	-0.157	-0.689	2.417
8	5.0	135.3	138.1	0.046	-0.166	-0.177	-0.710	2.582
10	3.7	147.3	152.7	0.042	-0.152	-0.199	-0.729	2.914
12.5	2.0	156.1	172.1	0.017	-0.141	-0.187	-0.772	3.817

表 2 中间板块不布置锚筋的拱端推力、拱座位移9.8kN/m², 9.8kN/m, mm

锚固水平		拱端推力		左拱座位移		右拱座位移		板块最大位移
中间板块	其余板块	左拱端	右拱端	X 向	Y 向	X 向	Y 向	
6.2	6.2	121.5	130.3	0.043	-0.179	-0.157	-0.689	2.417
$A_5=0$	6.2	155.6	162.6	0.038	-0.125	-0.116	-0.625	4.377
$A_{4-6}=0$	6.2	288.0	313.6	-0.178	0.131	0.198	-0.304	17.360

与拱圈均匀锚固相比,中间板块不锚固的情况下拱端推力、拱座和板块最大位移均增大,尤其是 $A_{4-6}=0$ 情况,拱端推力增大近 1.5 倍,板块最大位移增大 6 倍; $A_5=0$ 情况下,拱端推力增加不大,板块位移增大接近 1 倍。可见在中间板块不锚固的情况下, $A_5=0$ 情况较 $A_{4-6}=0$ 安全,且有利于拱圈成拱。

5 反拱曲率对稳定性影响

取扬压力为 150 kPa,均匀作用于底板下表面,无

钢筋锚固,对圆心角分别为 61.92°、74.79°、87.21°和 99.09°的反拱底板分别进行计算,结果如图 12 ~ 图 13,图 12 中以 74.79°所对应的力和位移为参照。

结果表明,拱端推力在圆心角为 74.79°时最大,说明成拱条件好,拱轴线合理;板块最大位移随圆心角增大而逐渐减小,其中 74.79°处变化较明显,小于 74.79°则底板最大位移变化较大;拱座 x 、 y 向位移在圆心角 74.79° 处相对较小,除右拱座 x 向位移其余均随圆心角增大有增大的趋势。

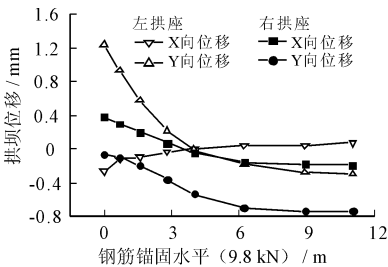


图 10 拱座位移

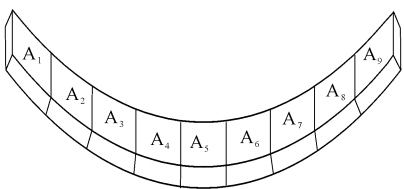


图 11 拱圈各板块的锚固水平

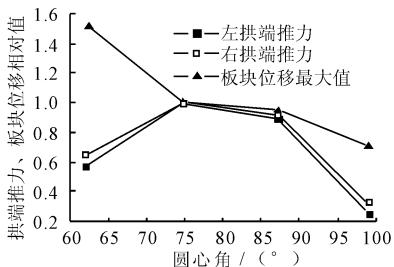


图 12 拱端推力、板块最大位移随圆心角变化

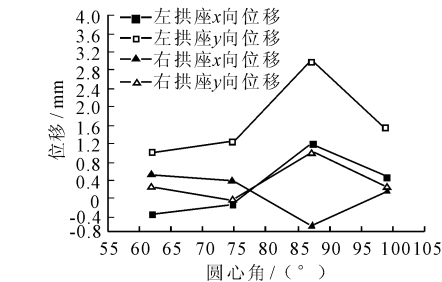


图 13 拱座位移随底板高程的变化

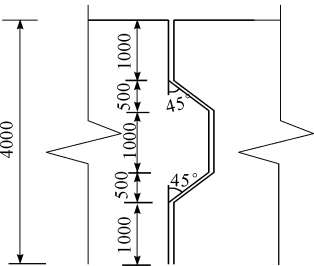


图 14 键槽结构示意图

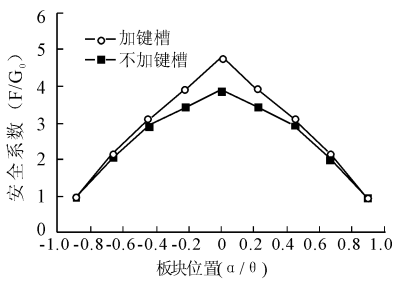


图 15 板块极限抗力

6 板块连接方式对板块稳定性影响分析

(1) 键槽对板块拱端推力的影响。为了改进板块之间的连接方式,在板块连接处设置键槽,如图 14 所示。研究表明,左右拱座位移在加键槽前后的变化并不明显,反拱底板最大位移数值基本不变,键槽对反拱底板整体稳定性影响不大。

(2) 键槽对板块局部稳定性影响。通过有限元分析,加键槽和不加键槽的极限抗力系数见图 15,极限抗力系数定义为 F/G_0 , F 是板块临界破坏时的上举力, G_0 为板块自重。加上键槽后板块局部稳定性有了较明显提高,尤其是中间板块,增幅达 23%。

7 结 语

无锚固时,拱端推力随扬压力成线性关系增长。加锚筋后,钢筋屈服前,拱端推力增长率为无锚固时的 20.48%;而在钢筋屈服后,拱端推力增长率基本和无锚固时的增长率相同。锚筋可以很大程度上减小拱端推力,对反拱形底板的整体稳定起到了关键性作用。

均匀锚固时,拱端推力和板块、拱座位移随着锚固水平的增加而减小,锚固量达到一定值后,基本不

再变化。从抵抗均匀荷载的角度来说,钢筋应均匀分布,使拱端推力最小,有利于反拱底板的整体稳定。

反拱曲率对底板稳定性影响较大,据文献[3]可知,反拱圆心角在 $45^\circ \sim 75^\circ$ 之间较为适宜,对于本工程,反拱弦长较大的水垫塘,取 74° 左右比较合理。键槽对整体稳定性影响不大,对局部稳定性的影响较大,尤其是中间板块。

参考文献:

- [1] 彭新民,王继敏,崔广涛. 拱坝水垫塘拱形底板受力与稳定性实验研究[J]. 水力发电学报,1999,18(2):52-59.
- [2] 史军,杨敏. 水垫塘反拱底板稳定性的块体弹簧元分析[J]. 水力发电学报,2004,23(2):73-78.
- [3] 马斌,练继建,杨敏,等. 高拱坝水垫塘反拱型底板的体型[J]. 天津大学学报,2007,40(11):1284-1290.
- [4] 马斌,练继建,杨敏. 水垫塘反拱型底板衬砌结构的非线性分析[J]. 天津大学学报,2007,40(5):536-541.
- [5] 练继建,杨敏,安刚. 反拱型水垫塘底板结构的稳定性研究[J]. 水利水电技术,2001,32(12):24-26.
- [6] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. (第2版)北京:中国水利水电出版社,1998.
- [7] 中华人民共和国水利部. SL253-2000. 溢洪道设计规范[S]. 北京:2000.
- [7] 煤炭科学院北京开采所. 煤矿地表移动与覆岩破断规律及其应用[M]. 北京:煤炭工业出版社,1981.
- [8] 刘天泉. 露头煤柱优化设计理论与技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.
- [9] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2010.
- [10] 国家煤炭工业局. 建筑物、水体下、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规程[M]. 北京:煤炭工业出版,2000.
- [11] 张燕,纪洪广,王金安. 不整合地层下煤层开采覆岩裂隙场发育特征[J]. 煤炭学报,2011,36(11):1795-1800.
- [12] 程学丰,刘盛东,刘登宪. 煤层采后围岩破坏规律的声波 CT 探测[J]. 煤炭学报,2001,26(2):153-155.
- [13] 高保彬,王晓蕾,朱明礼,等. 复合顶板高瓦斯厚煤层综放工作面覆岩“两带”动态发育特征[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增1):3444-3451.
- [14] 刘玉成. 煤层开采地表移动过程的 FLAC3D 模拟研究[J]. 煤炭科学技术,2012,40(5):93-95.
- [15] 杨同海. 45° 煤层水平分段综放开采上覆岩层移动破坏规律研究[D]. 西安:西安科技大学. 2006.

(上接第 39 页)

参考文献:

- [1] 郭文兵,柴华彬. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京:煤炭工业出版社,2008:120-135.
- [2] Gandhe A, Venkateswarlu V, Gupta R N. Extraction of coal under a surface water body - a strata control investigation [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2005, 38(5):399-410.
- [3] Niskovskiy Y, Vasilanovich A. Investigation of possibility to Apply untraditional and ecologically good methods of coal mining under sea bed[C]//. Proceedings of the 6th International Offshore and Polar Engineering Conference. Los Angeles: ISOPE, 1996:51-53.
- [4] Singh R N, Jakeman M. Strata monitoring investigations around longwall panels beneath the cataract reservoir[J]. Mine Water and the Environment, 2001, 20(2):33-41.
- [5] Winter T C, Buso D C, Shattuck P C, et al. The effect of terrace geology on groundwater movement and on the interaction of groundwater and surface water on a mountainside near Mirror Lake, New Hampshire, USA[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(1):21-32.
- [6] 刘天泉. 厚松散含水层下近松散层的安全开采[J]. 煤炭科学技术, 1986, 13(2):14-18.