

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.06.022

水轮机磨蚀试验设备的设计参数与总体设计

李浩平¹, 李峰², 卞雪³, 唐傲翔³

(1. 三峡大学 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 研究了过机水流水力因素及浑水中泥沙特性对水轮机磨蚀状态的影响, 分析了国内主要电站水轮机的相关过流指标数据, 研究确定了水轮机部件磨蚀试验设备的试验参数、设计参数及关键问题, 确定了试验设备旋转喷射式磨蚀试验原理, 完成了冲磨试验设备的研制。试验设备扩大了适应工况范围, 模拟工况真实, 调速范围大, 冲刷速度高, 冲刷角度可调, 有效提高了磨蚀试验的效率。

关键词: 水轮机; 磨蚀试验设备; 设计参数; 总体结构

中图分类号: TH 12; T V 152 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1124-04

Design parameters and overall structure of turbine abrasion test equipment

LI Haoping¹, LI Feng², BIAN Xue³, TANG Aoxiang³

(1. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Hydroelectric & Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In this paper, the effects of hydraulic factors and sediment characteristics in turbid water on the abrasion state of turbine were studied, the turbine flow index data of main power stations were analyzed, the test parameters, design parameters, and key issues of turbine abrasion test equipment were determined, the principle of rotating jet mode abrasion test was illustrated, and the overall structure design of the test equipment was developed. The test equipment can expand the applicable working conditions, adjust the grinding speed and grinding angle, and improve the efficiency of abrasion test.

Key words: turbine; abrasion test equipment; design parameter; overall structure

在我国的水电开发中,存在着突出的泥沙磨蚀问题。水轮机过流部件磨蚀现象严重影响水轮机的正常运行,所以磨蚀的研究与控制至关重要。目前提出的磨蚀理论往往是在理想条件下试验得到的,因此,选择合适的试验方法和试验设备是研究水轮机过流部件磨蚀机理的前提。目前国内外用于研究磨蚀问题的试验设备有室内试验设备和室外试验设备,室内试验设备类型有:圈盘绕流式、旋转喷射式、文丘利管水洞式等,室外试验设备是利用天然河水落差建造的浑水空化空蚀设备。这些设备都不同程度地存在着适应工况差、试验参数可调范围窄、试验效率低等局限性。针对以上问题,研发功能更全面的试验设备是十分必要的。

在试验设备的研发过程中,通过研究影响水轮机磨蚀破坏的实际工况、主要指标、主要参数及取值范围,确定试验设备的试验原理、试验方法和试验参数,研制模拟工况真实、试验速度高、试验参数可调的磨蚀试验设备,将为基于减磨结

构的水轮机过流部件数字化设计提供试验依据。

1 影响水轮机磨蚀试验的指标确定

国内外研究^[1]表明,水轮机泥沙磨损量与相关因素的关系可用下式表示:

$$\delta = k S \beta W^m T$$

式中: δ 为磨损量,计算部位的平均磨损深度(mm); k 为磨损系数, $k = 1/\epsilon$, ϵ 为材料耐磨系数; S 为平均含沙量(kg/m^3); β 为泥沙磨损能力的综合系数,与泥沙成分、粒径大小、颗粒形状、硬度等有关; W 为过机水流流速(m/s),指数近似 $m = 3.0$; T 为过流历时(h)。

可见,不考虑过流部件的材料因素,泥沙(悬移质)对水轮机的磨蚀作用取决于水力因素与泥沙因素。前者包括过机水流流速、过流历时、水流掺气、流态等;后者包括泥沙含量、颗粒级配、形状、矿物质含量及硬度等。在影响磨蚀磨损

收稿日期: 2014-04-03 修回日期: 2015-03-11 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2100.036.html>

基金项目: 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2012KJX06); 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开放基金(TWHR-SKL-201413)

作者简介: 李浩平(1971-),女,广东台山人,教授,主要从事机械设计制造自动化、磨蚀试验设备研发。E-mail: lhp@126.com

程度的因素中,以过机水流流速的影响最为显著,一般磨蚀量与其成3次方关系,如果产生空蚀和泥沙磨蚀联合作用的磨蚀量将与速度成6次方关系。磨蚀磨蚀强度与含沙量、颗粒粒径成线形关系。

由此分析得出:过机水流流速、泥沙特性(含沙量、颗粒粒径)是影响材料磨蚀性能试验最主要的两大指标。

1.1 过机流速

过机流速指的是过机水流相对水轮机叶片表面的速度,是影响水轮机磨蚀的决定性因素之一。国内主要电站水轮机过机流速数据^[1-6]见表1。

表1 国内主要电站过机流速及含沙量数据

Tab. 1 The flow velocity and sediment concentration data of main hydropower stations

| 电站 | 水轮机型号 | 过机流速 /(m·s ⁻¹) | 平均含沙量 /(kg·m ⁻³) | 最大含沙量 /(kg·m ⁻³) |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 三门峡 | ZZK7LJ610 ZZ010LJ600 | 33 | 37.6 | 1200 |
| 小浪底 | HL-LJ635 | 35 | 37.0 | 68.6 |
| 刘家峡 | HL001-LJ550 | 37.6 | 3.14 | 515 |
| 万家寨 | HLEFN235LJ6100 HLS217LJ585 | 33.4 | 5.7 | 37.6 |
| 盐锅峡 | HLI23-LH410 | 27 | 2.94 | 360 |
| 青铜峡 | ZZ500LH550 | 32 | 7.68 | 1190 |
| 天桥 | KVB37-18 | 27 | 13.2 | 605 |
| 葛洲坝 | ZZ500 | 32 | 1.18 | 1.46 |
| 三峡 | ALSTOM 机组、 VGS 机组 | 40 | 0.4 | 1.0 |
| 红山嘴 3级 | HL702-LJ140 | 33.0 | 2.38 | 402 |
| 塔苏克 | HLA801-LJ215 | 35.3 | 3.18 | 49.3 |

总结可得:国内主要河流上已经运行的大多数重要电站水轮机过机流速≤40 m/s。

1.2 泥沙含量

国内主要河流上已经运行的重要电站水轮机的过机平均泥沙含量及最大含量^[1-6]见表1。

分析可得:国内主要河流上已经运行的重要电站水轮机过机平均含沙量≤37.6 kg/m³,最大含沙量达到≤1 200 kg/m³。

1.3 泥沙颗粒级配

资料^[7]显示,以长江和黄河为例,近50年代表站泥沙颗粒平均粒径分别见图1、图2。

总结数据可得:近年国内主要河流的泥沙颗粒平均中值粒径范围在:0.003~0.05 mm。

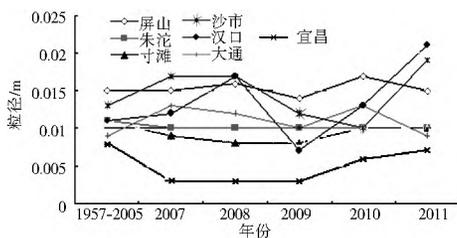


图1 近年长江代表站泥沙平均中值粒径范围

Fig. 1 Average size of sediment in the Yangtze River in recent years

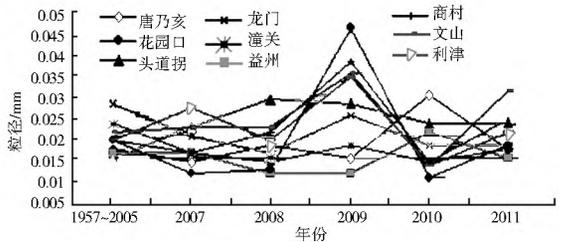


图2 近年黄河代表站泥沙平均中值粒径范围

Fig. 2 Average size of sediment in the Yellow River in recent years

2 泥沙磨蚀试验设备研发拟解决的关键问题

泥沙磨蚀试验方法与装置多种多样,使用仪器不同,试验结果是不同的,甚至还相差很大。所以,设计试验方法和试验参数合适的磨蚀试验设备是试验成功的重要因素。

浑水含沙水流空蚀室内试验设备是常用研究磨蚀问题的试验设备,可分为以下几种:振动空蚀仪(磁致伸缩仪)、转动空蚀仪(圈盘式绕流法)、旋转喷射设备、浑水系统流动型空蚀仪等^[8],这些常用设备都存在一定的局限性:模拟工况欠真实、试验速度低、试验参数不可调等。依据相关标准,研发水轮机过流部件磨蚀试验设备,必须解决以下关键问题:

- (1) 较好地模拟实际挟沙水流条件下的工况,试验过程兼具泥沙磨蚀和空化空蚀的共同作用;
- (2) 扩大有效的试验参数值调整范围,如:冲刷速度、冲刷角度、含沙量、泥沙粒径等,以扩大磨蚀试验的适应工况范围,提高磨蚀试验的效率;
- (3) 扩大试验范围:可进行不同材料(如:金属(水轮机过流部件)、非金属(混凝土)、涂层材料等)的泥沙特性试验。

解决上述问题,研究适合不同材料在变流速、变含沙量及不同冲刷角度等动态条件下的抗磨蚀性能试验设备,这是本磨蚀试验设备的主要研发思路。

3 磨蚀试验原理及试验参数、设计参数的确定

对现有磨蚀试验方法及设备的工作特点进行综合分析,鉴于旋转喷射式试验设备模拟实际水流流态较好,试验过程兼具了泥沙磨蚀和空化空蚀的共同作用,可实现较大试验参数范围等特点^[9-10],本文所设计的磨蚀试验设备拟采用旋转喷射式磨蚀试验原理。

本旋转喷射式磨蚀试验设备工作原理如图3所示:将试件夹持固定在一个可以旋转的圆盘式夹具上,通过喷嘴以一定速度喷射含砂水流,扫射到试件表面使试件受损,达到检验试件材料抗磨蚀能力的目的。

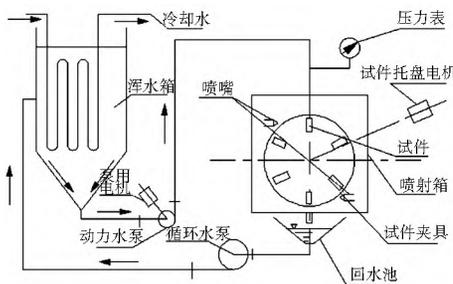


图3 旋转喷射式冲磨试验装置原理图

Fig. 3 The principle of the rotating jet abrasion test

冲刷速度和沙粒特性(含沙量、颗粒粒径)是本设备最主

要的试验参数,涉及到有效的试验参数值调整范围。冲刷角度、试件旋转直径是试验设备的主要设计参数,影响到试验设备的规模、试验流量、试件转速、试验精度等。

3.1 冲磨速度的选择

近年来在大中型水轮机选型中,为了缩小尺寸,提高效率,在水轮机参数选择时有向高参数发展的趋势,由于水轮机参数高,过机速度加大,在有泥沙河流的水电站其水轮机过流表面发生严重磨蚀。为此,磨蚀试验设备速度指标应根据水轮机参数要求选定。

前文分析可知:我国主要河流上的重要电站水轮机的过机水流速度在 40 m/s 以下,要实现挟沙水流对水轮机的冲磨速度的模拟,就要求试验设备的冲磨试验速度至少在 0~40 m/s,并且在此范围内任意可调,为了提高试验效率,缩短试验时间,必须加快试验速度,故拟将冲磨速度提高到 20~100 m/s 速度范围任意可调。目前国内各研究所和实验室使用的水工材料冲磨试验设备基本都采用的是机械式有极传动,试验速度在 20~40 m/s 范围内。要实现试验速度大范围、可连续调节,拟采用机械调速和液压调速联合作用的迭加式合成调速方式来实现高冲磨速度、大调速范围的任意调速目标。

本设计中,试件受冲磨的速度即试件表面承受的含沙水流冲刷速度是由喷嘴喷射的含沙水流速度和试件旋转速度共同决定的,为两者的矢量和。即:

$$\vec{V}_{\text{冲刷}} = \vec{V}_{\text{喷射}} + \vec{V}_{\text{旋转}}$$

喷嘴喷射速度 $V_{\text{喷射}}$ 和试件旋转速度 $V_{\text{旋转}}$ 均可调节,且喷嘴喷射速度通过调节水流压力可实现无级调速,所以本试验机的试验速度 $V_{\text{冲刷}}$ 可实现任意连续速度调节。设计中,速度分配方式是: $V_{\text{喷射}} = 10 \sim 40 \text{ m/s}$, $V_{\text{旋转}} = 10 \sim 60 \text{ m/s}$, $V_{\text{冲刷}}$ 可以达到 20~100 m/s。当然,国内其他地区有极少数水电站的过机流速超过 100 m/s,在试验时可以通过调节变频调速 SEW 可调电机输出速度,提高 $V_{\text{旋转}}$,从而提高冲磨速度以适应实际工况。

3.2 泥沙参数设计

近年,国内主要河流上电站水轮机的过机平均泥沙含量范围在: $1.0 \sim 37.6 \text{ kg/m}^3$,国内主要河流的泥沙颗粒中值粒径范围在: $0.003 \sim 0.05 \text{ mm}$,最大粒径范围 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$ 。对于多泥沙的定义,一般以平均含沙量 10 kg/m^3 为界定,虽然汛期最大含沙量时是水轮机磨蚀最剧烈的时期,但为了模拟实际冲磨工况,提高试验效率,降低泥沙堵塞管道和喷嘴,便于试验的顺利进行,试验设备水流含沙参数设计如下:试验沙粒粒径(中值粒径 d_{50})范围在 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$ 内,沙粒含量(质量含量)范围在 $1.0 \sim 20 \text{ kg/m}^3$ 内可调整,依委托单位提供的泥沙实样确定。

3.3 冲刷角度设计

常用水轮机形式有:轴流式、混流式、斜流式和贯流式等,不同类型水轮机工作时,实际含沙水流对叶片等过水表面的冲刷角度不同,故试验设备冲刷的入射角设计为可调整,通过改变试件夹具的夹持角度来改变射流冲角。从与试验叶片表面接近相切角到垂直入射,设计冲角范围在: $15^\circ \sim 90^\circ$ 可调整。

3.4 试件旋转直径设计

在磨蚀试验设备设计中,拟采用试件旋转系统和水沙循环喷射系统来实现水沙喷射磨蚀模拟和喷射速度—旋转速度的迭加。试件旋转传动系统主要用于叶片试件的旋转传动,即进行 $V_{\text{旋转}}$ 的传递与调节,设计确定:为获得较高的冲刷速度,试件旋转直径范围为 600 mm,试件转速范围 $\leq 60 \text{ m/s}$ 。

4 磨蚀试验设备总体结构设计

本磨蚀设备主要由试件旋转传动系统、液压喷射系统、箱体部分等三大部分组成,其整体装配结构见图 4。

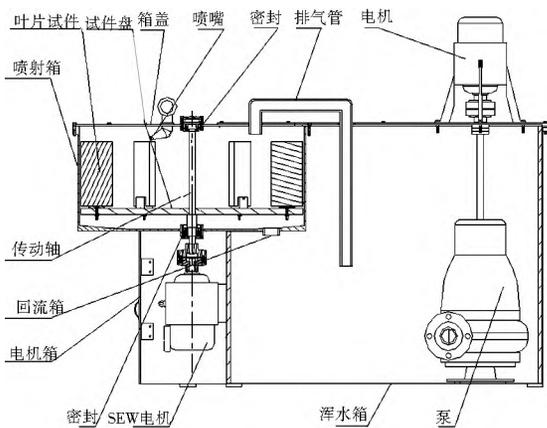


图 4 设备整体结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the overall structure of test

4.1 试件旋转传动系统

试件传动部分主要包括原动电机、传动轴、试件卡盘、支承零件和密封件等几部分。主要用于叶片等试件安装及旋转传动,实现试件喷射角度的调整,要求与喷射系统协同工作。电机采用变频调速 SEW 类型, DV 型: Y80F-2 型三相异步电动机,输出转速 $n_n = 2825 \text{ r/min}$ 。手柄手动调节,具有转速数字显示表,方便速度调节,变频器采用交—直—交、电压型变频器,型号 AF-3002-1A5。电机与传动轴之间采用弹性柱销联轴器直接传递运动和动力,简化传动路线。

冲刷角度调节:试件采用螺栓和夹具固定于试件卡盘上,试件卡盘上刻有角度值,通过调整试件夹具角度以改变试件在卡盘上的装夹位置,达到调节冲刷角度的目的,从而试验不同入射角下的试件磨蚀机理。试件的安装及调节机构见图 5 和图 6。

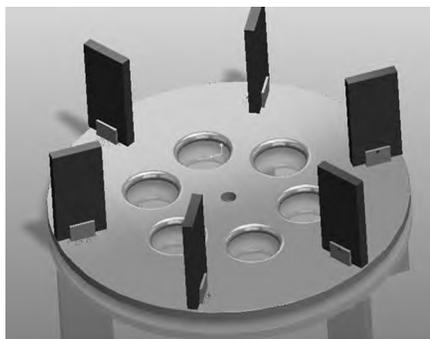


图 5 试件安装结构图

Fig. 5 Structural diagram of specimen installation

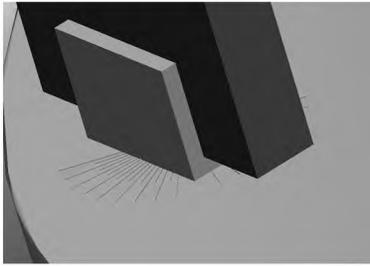


图6 试件装夹调整结构图

Fig. 6 Structural diagram of specimen clamping and adjustment

4.2 液压喷射系统

液压喷射系统是完成试件喷射冲刷的主要部分,通过喷嘴喷射含沙水流对叶片试件进行喷射冲刷,在叶片表面形成冲磨痕迹,达到测试叶片试件抗冲耐磨能力的目的。其功能是完成含沙水喷射,实现喷射速度的无极调速,包括水泵、控制水阀、流量计、水箱、喷头装置、进水和出水管道等。喷射系统动力水泵采用QW系列80WG型电机潜水污水泵。喷射流量控制通过溢流、节流回路来控制,溢流阀选用BT-1032型,节流阀选用SR(C)T-1050,流量计的选用考虑使水和砂粒的二相混合流不易滞留的元件,避免流体堵塞引压管,选择采用低频矩形波激磁型电磁流量计,流量计安装在直管道上。液压喷射系统工作原理见图7。

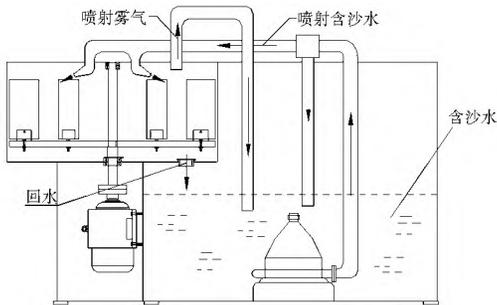


图7 液压喷射系统原理图

Fig. 7 The principle of the hydraulic injection system

4.3 箱体部分

箱体作为支撑结构,包括浑水箱、喷射箱、电机支撑箱。主要用于支撑和安装试件旋转传动系统、液压喷射系统和泥沙浑水系统,保证装置运行时的刚度和稳定性。

浑水箱主要用于容纳水沙混合物,安装浑水泵,底部铺设循环冷却水管,用水泵将冷却水送入浑水箱内,再回冷却箱,形成冷却水循环系统,带走含沙水中的大部分热量,保证含砂水温度控制在 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,确保试验顺利进行。

喷射箱主要用于安装试件及试件旋转卡盘,密封完成喷射冲刷工作,由于使用高压水喷射,试验中会产生大量的带压水汽,所以喷射箱必须密封良好,箱体上部的容器盖和容器罐靠螺栓联结,采用橡胶密封圈密封;喷射箱底内部为圆锥状,以便水沙向排水口流动。

电机支撑箱主要用于安装和支撑用于试件旋转传动的电机。喷射箱和电机箱通过螺栓连接方式固定为一体,保证整体装置的传动稳定性和可靠性;箱体采用焊接方式加工。

5 结语

本喷射式水轮机部件冲磨试验设备的主要特点在于:

(1) 扩大了磨蚀试验的适应工况范围,可以开展变流速、变含沙量条件下金属材料、非金属材料、涂层材料及水工材料的磨蚀试验;(2) 试验设备设计参数是根据国内主要电站水轮机的过流数据总结得出:冲磨速度 $20\sim 100\text{ m/s}$,沙粒径范围 $\leq 0.1\sim 1\text{ mm}$,沙粒含量范围 $\leq 1.0\sim 20\text{ kg/m}^3$,冲角范围 $15^{\circ}\sim 90^{\circ}$,实现了模拟工况真实,调速范围大,冲刷速度高,冲刷角度可调,试验效率高的要求。当然,本设备如果能够增加试验数据检测、收集、输出和结果分析功能,设备的自动化测试能力将大大提高。

参考文献(References):

- [1] 顾四行,杨天生.水机磨蚀研究与实践50年[M].北京:中国水利水电出版社,2005.(GU Si xing, YANG Tian sheng. 50 years of abrasion research and practice of hydraulic machinery[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 长江水利委员会.葛洲坝水利枢纽论文选集[M].郑州:黄河水利出版社,2002.(Changjiang Water Resources Commission. Gezhouba Water Conservancy Project Papers[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002. (in Chinese))
- [3] 湖北省水力发电工程学会.湖北水电50年[M].武汉:长江出版社,2006.(Hubei hydroPower Engineering Society. 50 years of Hubei hydropower[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 朱兴旺.小浪底电站多泥沙条件下的水轮机选型设计[J].水利发电,2004,(4):42-44.(ZHU Xing wang. Type selection of the turbine of the Xiaolangdi hydropower station in the sandy river[J]. Water Power, 2004, (4): 42-44. (in Chinese))
- [5] 郭晚荣.三门峡水电站水轮机磨蚀破坏原因及规律[J].人民黄河,1995(12):23-26.(GUO Wan rong. The reasons and the laws of hydraulic turbine destroy by corrosion in Sanmenxia Hydroelectric Station[J]. Yellow River, 1995(12): 23-26. (in Chinese))
- [6] 刘家麟.葛洲坝电站水轮机严重损坏成因及建议[J].水力发电学报,1995(1):13-24.(LIU Jia lin. The reason of the turbine silt damage in Gezhouba Power Station and the method to reduce the damage[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995(1): 13-24. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报(2007、2008、2009、2010、2011)[M].北京:中国水利水电出版社,2008、2009、2010、2011、2012.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China River Sediment Bulletin[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008、2009、2010、2011、2012. (in Chinese))
- [8] 缙文娟,吴建华.磨蚀试验设备研究与应用现状[A].水力学与水文学信息学大会论文集[C].2007(6):335-341.(GOU Wen juan, WU Jia hua. Experimental facilities of abrasion and its applications [A]. Hydraulics and Water Conservancy Information Science Conference Proceedings[C]. 2007(6): 335-341. (in Chinese))
- [9] 李浩平,张涛,李峰.喷射式混凝土冲磨试验机研究与开发[J].人民黄河,2011(1):106-107.(LI Hao ping, ZHANG Tao, LI Feng. Development of rotating jet mode concrete abrasion resistance performance testing machine[J]. Yellow River, 2011(1): 106-107. (in Chinese))

(下转第1155页)

- WEI Xingli, XUE Qiang. Formation mechanism and hazard causes of the Yangya landslide in Yan'an city[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1230-1234. (in Chinese)
- [2] 殷跃平. 中国典型滑坡[M]. 北京: 中国大地出版社, 2007(YIN Yue ping. landslides in China selected case studies[M]. Beijing: China land press, 2007. (in Chinese))
- [3] 穆鹏, 吴玮江, 杨涛. 2009年兰州市九州石峡口滑坡成因及其西侧高边坡稳定性研究[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4): 343-348. (MU Peng, WU Wei jiang, YANG Tao. Study on the forming cause of Shixiakou landslide at Jiuzhou, Lanzhou city, in2009 and stability of its western neighbouring high slope[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(4): 343-348. (in Chinese))
- [4] 王浩, 廖小平. 边坡开挖卸荷松弛区的力学性质研究[J]. 中国地质灾害与防治学报. 2007, 18(Z1): 5-10(WANG Hao, LIAO Xiaoping. Research on the mechanical character of relaxing zone of slopes due to excavation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(Z1): 5-10. (in Chinese))
- [5] 陈春利. 延安地区人工开挖黄土边坡的变形破坏机理研究[D]. 长安大学硕士学位论文. 2012. (CHEN Chunli. Study on the deformation and failure Mechanism of excavated loess slope in Yan'an [D]. Chang'an University master degree. 2012 (in Chinese))
- [6] 龚成明, 程谦恭, 杨林浩, 等. 黄土高边坡开挖过程的变形监测分析[J]. 铁道学报. 2010, 32(5): 119-124. (GONG Cheng ming, CHENG Qian gong, YANG Lin hao, etc.. Case study of deformation behaviour of high loess slope in excavation[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 119-124. (in Chinese))
- [7] 肖世国, 周德培. 开挖边坡松弛区的确定与数值分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(3): 318-322. (XIAO Shi guo, ZHOU De pei. Determination and numerical analysis method of relaxation region for cutting slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3): 318-322. (in Chinese))
- [8] 阿布·里提甫. 基于FLAC3D的黄土边坡稳定性分析[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(9): 32-35. (AB·Litip. Analysis of loess slope stability based on FLAC3D[J]. Coal geology of China, 2008, 20(9): 32-35. (in Chinese))
- [9] 蒋恒. 黄土边坡开挖模拟及稳定性分析[J]. 四川建筑. 2009, 29(02): 105-106. (JIANG Heng. The loess slope excavation simulation and stability analysis[J]. Sichuan Architecture, 2009, 29(02): 105-106. (in Chinese))
- [10] 周建富, 程谦恭, 朱圻. 黄土高陡边坡开挖及土钉支护数值模拟分析[J]. 路基工程, 2010, (3): 9-12. (ZHOU Jian fu, CHENG Qian gong, ZHU Qi. Analysis on numerical simulation of high steep loess slope excavation and soil nailed support[J]. Subgrade Engineering, 2010, (3): 9-12. (in Chinese))
- [11] 孟庆银. 用有限元方法进行开挖边坡变形和稳定性分析[J]. 南昌航空大学学报: 自然科学版, 2010(2): 77-80. (MENG Qing yin. Analysis of deformation and stability of excavated slope by FEM[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2010(2): 77-80. (in Chinese))
- [12] 李明, 张嘎, 胡耘, 等. 边坡开挖破坏过程的离心模型试验研究[J]. 岩土力学. 201031, (02) 366-370. (LI Ming, ZHANG Ga, HU Yun, et al. Centrifuge model tests on excavation induced failure of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 201031, (02) 366-370. (in Chinese))
- [13] 龚成明, 程谦恭, 刘争平. 黄土边坡开挖与支护效应的离心模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11). 348-3486. (GONG Cheng ming, CHENG Qian gong, LIU Zheng ping. Centrifuge model tests on excavation and reinforcement effect of loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11). 348-3486. (in Chinese))
- [14] 葛阳成. 有限差分-强度折减法在边坡稳定分析中的应用[J]. 北京电力高等专科学校学报: 自然科学版, 2012, 29(1): 277-278. (GE Yang cheng. Finite difference-strength subtraction in the application of the slope stability analysis[J]. Beijing Electric Power College (Natural Sciences), 2012, 29(1): 277-278. (in Chinese))
- [15] 于庆磊, 唐春安, 朱万成, 唐世斌. 基于数字图像的混凝土破坏过程的数值模拟[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 72-78. (YU Qing lei Tang Chun an, ZHU wan cheng, etc.. Digital image based numerical simulation on failure process of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 72-78. (in Chinese))

(上接第1127页)

- [10] B Rajkarnikar, H P Neopane, BS Thapa. Development of rotating disc apparatus for test of sediment induced erosion in Francis runner blades[J]. Wear, 2013(306): 119-125.
- [11] Steller J, Krella A, Koronowicz J, et al. Towards quantitative assessment of material resistance to cavitation erosion[J]. Wear, 2005, 258(1/2/3/4): 604-613
- [12] 岳高峰, 李延频, 陈德新. 多泥沙河流水轮机磨蚀改造分析[J]. 水力发电, 2010, 36(5): 56-58. (YUE Gao feng, LI Yan pin, CHEN De xin. Modification of hydraulic turbine under abrasion and erosion on sediment laden river[J]. Water Power, 2010, 36(5): 56-58. (in Chinese))
- [13] 金汉林. 含沙河流中低比速混流式水轮机内部流动数值模拟[D]. 西华大学, 2013. (JIN Han lin. Numerical simulation of internal flow in low specific speed Francis turbine in sand water[D]. Xihua University, 2013. (in Chinese))
- [14] 任岩, 张兰金, 李延频, 等. 水轮机的磨蚀失效特性[J]. 排灌机械工程学报, 2012(2): 188-191. (REN Yan, ZHANG Lan jin, LI Yan pin, et al. Sand abrasion characteristics of materials for hydro turbines[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012(2): 188-191. (in Chinese))
- [15] 卢浩, 周明, 王一鑫, 等. 水轮机导叶磨蚀模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(3): 119-121. (LU Hao, ZHOU Ming, WANG Yi xin, et al. Experiment model research in guide vane erosion of the hydraulic turbine[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(3): 119-121. (in Chinese))
- [16] 楚清河, 任岩. 不同含沙量不同流速下水轮机磨蚀性能研究[J]. 人民黄河, 2011(8): 120-121. (CHU Qing he, REN Yan. Abrasion performance of water turbine under different conditions of sediments[J]. Yellow River, 2011(8): 120-121. (in Chinese))