

GNF 新型涂料抗冲耐磨性能试验研究

吴振, 缙文娟

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点试验室, 天津 300072)

摘要: 随着我国一批大型高水头水电站的兴建, 由于水流含沙量大、流速高、流量大等特点, 因此对混凝土构件和过流面抗冲耐磨材料的性能提出了更高的要求。总结国内外在材料冲蚀磨损方面的研究情况, 选取 GNF 涂料涂层, 在圆环抗磨试验机上进行抗冲磨试验, 研究涂层与混凝土试件的抗冲耐磨性能。结果表明: 在泥沙粒径为 0.02 ~ 0.04 mm 之间 GNF 涂料涂层的抗冲磨效果最好; 在几种涂层养护条件下室内养护条件最适宜本涂层。

关键词: 冲刷磨损; 抗冲磨强度; GNF 涂料; 圆环试验; 泥沙

中图分类号: TV43; TV65

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0185-04

The experimental study of resistance to impact and abrasion for GNF new coatings

WU Zhen, GOU Wenjuan

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: As the construction of a number of high head hydropower stations in our country, the performance requirements of wear resistant material for concrete member and over-flow surface are more and more strict due to the large flow sediment concentration, the characteristics of high velocity and large flow. By summarizing the domestic and foreign research situations in the field of material erosion wear, GNF paint coating was selected in this paper. The grinding experiment was carried out using the ring anti-wear testing machine to study the resistance of the coating and concrete specimen and wear-resisting performance. The results showed that, the effect of coating was the best grinding when the sediment particle size ranged from 0.02 mm to 0.04 mm, also, the indoor curing condition among different curing conditions was the best fit for the best coating.

Key words: wash and wear; resistance to impact strength; GNF coating; ring test; sediment

1 研究背景

我国的许多水利枢纽工程具有高水头、大流量、河谷狭窄、泄洪功率大等特点, 使得水工建筑物冲磨破坏问题严重^[1]。其主要发生在大坝溢洪道、泄洪洞、溢流坝、消力池、闸室底板、输水廊道以及电站排沙孔等部位^[2]。调查显示, 有近 70% 的大型混凝土坝存在此类病害^[3], 尤其是我国黄河流域和西南地区的水利工程, 由于水流含沙量高且泄洪流速大, 泄水建筑物受到较为严重的冲磨破坏。为了解决这一问题, 除了优化过流结构体型设计、增加有效的消能措施、加强工程的运行管理等方法^[4], 提高水工混

凝土的抗冲磨性能也是一种重要的改善途径。本文主要针对混凝土材料表面的覆盖层处理^[5], 即从材料学和摩擦学^[6]的角度出发, 选择高性能的抗冲蚀磨损的材料作为抗磨涂层, 并且要求涂层应该能承受足够的张力缓解冲蚀破坏, 同时应具有硬度高的特性, 以防止由淤泥、沙砾、石子所造成的磨损破坏^[7]。涂层的使用强化了过流表面, 增强了耐磨性能, 进而减少磨损。由此可见水工建筑物的抗冲磨研究对我国水利水电建设有重大的意义, 本文采用 GNF 涂料涂层作为研究对象, 分析其在不同工况条件下的抗磨性能, 为 GNF 涂料涂层的推广使用提供参考。

收稿日期: 2016-08-24; 修回日期: 2016-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579172); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51409187); 天津市应用基础与前沿技术研究计划(青年项目)(15JCQNJC07100)

作者简介: 吴振(1991-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向: 水利水电工程。

通讯作者: 缙文娟(1983-), 女, 河南郑州人, 博士, 讲师, 研究方向: 水利水电工程。

2 冲蚀磨损研究进展

目前,国内外对过流部件磨损的试验研究主要从以下几个方面进行:材料本身的抗磨损性能^[8],冲磨介质的速度、冲角、含量等条件的影响,冲磨介质的物理力学特性的影响等。

泥沙磨损问题的研究经过多年的发展,国内外在此方面已经积累了丰富的理论及经验成果。在泥沙粒径对材料磨损破坏的影响上,姚启鹏^[9]指出,对于多种磨损率的表征方式,都无法具体给出材料磨损与粒径的系数或指数关系,在以钢材作为磨损材料的试验结果中可以看出,泥沙粒径在 0.04 ~ 0.14 mm 区间内变化时,钢材的磨损率变化较明显;余江成等^[10]指出在泥沙颗粒形状及硬颗粒含量相接近的情况下,随着泥沙粒径的增大,其对材料的磨损能力越强;黄细彬^[11]认为泥沙颗粒在小于某粒径及沙粒在冲击材料边界时,由于穿透边界层耗散了大部分能量,此时沙粒对材料并无磨损作用,同时指出泥沙粒径大概为 0.1 mm。

泥沙含量在对材料磨损破坏的方面也存在着同样的影响,邓军等^[12]指出当水流含沙量体积比在 10% 以下时,水体仍然保持牛顿流体的特性,即各泥沙粒径互不影响,泥沙含量的增加对磨损破坏的影响较明显;当体积含沙量大于此界限,水体黏滞性急剧增大,紊动强度减弱,从而造成泥沙颗粒能量的减少,使得泥沙颗粒对材料的磨损破坏作用减弱。程则久^[13]指出当泥沙含量小于某一界限时,随着泥沙含量增大,磨损加剧;当泥沙含量大于这一界限时,随着泥沙含量增大,磨损效果减弱。

3 GNF 涂料性能检测

GNF 涂料是利用无机纤维将碳束或者纤维压焊至试块的受拉面,从而达到增加混凝土强度的目的。针对涂料的耐久性进行了抗干缩湿胀测试和抗冻性测试,测试分别是在干湿交替和冻融交替的条件下进行的,本次测试是与美国 greennanofinish 公司合作进行,测试结果如图 1 和 2 所示。

试验样品共 8 组,包括:第 1 组为无涂料试块;第 2、3 组分别为含有 2% 和 4% 的离散碳纤维的试块;第 4、5、6 组分别为含有 1 个、两个、3 个碳丝束的试块;第 7、8 组为分别含有 1 层和两层碳织物的试块。干湿条件下,第 8 组试验未进行。碳纤维是无腐蚀性的,因此试件基底或交接面不会发生腐蚀破坏。在干缩湿胀测试中,试块进行 0 次、50 次和

100 次的周期性环境测试;在冻融测试中,将试块放入 5% 盐水中,进行 0 次和 50 次的冰冻和融解交替测试。在这两种测试条件下,经过多次的环境交替后,耐久性的峰值降低小于 10%,峰值荷载即为材料保持其自身有效性的同时所能承受的最大荷载。但是无涂层时,混凝土在冻融测试条件下承受荷载变化较大,可以看出材料的耐久性能非常稳定,对增强混凝土的抗冲耐磨性能有很大提高。

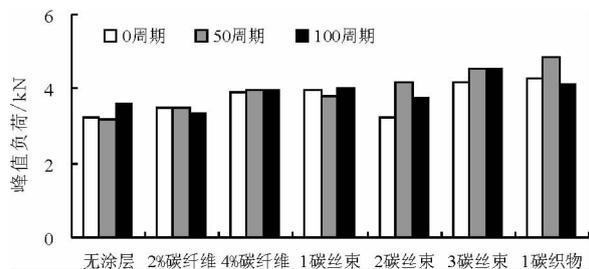


图 1 干湿循环条件下的峰值荷载

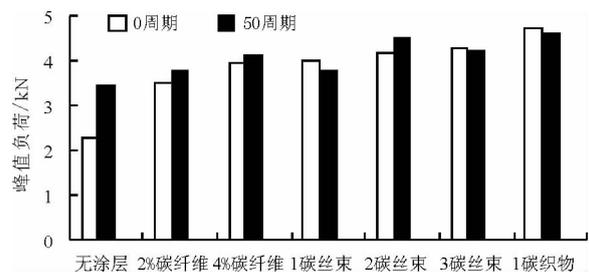


图 2 冻融循环条件下的峰值荷载

4 抗冲磨试验

4.1 试验介绍

抗冲磨试验是通过测定混凝土或者其它材料表面受到含沙水流磨损的情况,以此来研究混凝土和其它材料抵抗含沙水流冲磨性能。本文采用《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150 - 2001)中推荐的圆环法抗冲磨试验。

圆环法抗冲磨试验是通过电机带动含沙水流转动对混凝土圆环试件的内环表面进行冲磨,试验结果表明其冲磨破坏的试验情况与大多数实际工程混凝土的冲磨破坏的情况类似,因此可以将其运用于评价混凝土及其它材料的抗冲磨能力。文中试验选用圆环含沙水流冲刷试验仪,标准规定圆环内表面处流速为 14.3 m/s,磨损剂分别选用 0.02 ~ 0.04 mm、0.05 ~ 0.1 mm、0.15 ~ 0.4 mm、0.5 ~ 0.85 mm 4 种不同粒径范围的沙子,用以研究不同泥沙粒径工况下涂料及混凝土的抗冲磨性能。水流含沙量分别选用上述标准规定的 150 kg/m³ 以及根据黄河多

年平均含沙量而定的 50 kg/m^3 ,为了精确地了解涂层前期的冲磨情况,设定试验前 30 min 每冲磨 10 min 取出试件称重,30 min 后,每冲磨 30 min 取出称重,更换磨损剂,总冲磨时间为 240 min。

混凝土抗含沙水流冲刷的指标主要以抗冲磨强度表示,按公式(1)计算:

$$f_a = \frac{TA}{\Delta M} \quad (1)$$

式中: f_a 为抗冲磨强度,即单位面积上被磨损单位质量所需的时间, $\text{h}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$; T 为试验累计时间, h ; A 为试件受冲磨面积,本试验值为 380 cm^2 ; ΔM 为经 T 时段冲磨后,试件损失的累计质量, g 。

混凝土试件的制作严格依照标准制备,允许骨料最大粒径为 20mm。试件成型后,放在养护间养护 30d,试件达到试验龄期的前两天,将试件放入水中浸水饱和。试验时,取出试件,擦去表面水分,称量试件重量。将试件托盘从冲刷仪中取出,在托盘底部放好防护垫层及隔沙泡沫塑料垫圈,然后放入试件,在试件圆环内加入磨损剂,盖上泡沫塑料隔沙圈及止水橡皮垫圈。将装好的试件托盘装入冲刷仪,转动手轮压紧试件,打开冷却水,启动电动机并开始计时。为了精确地了解涂层前期的冲磨情况,设定试验前 30 min 每冲磨 10 min 取出试件称重,30 min 后,每冲磨 30 min 取出称重,更换磨损剂,总冲磨时间为 240 min,试验工况见表 1。

表 1 试验工况表

工况	沙粒径/ mm	含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	龄期/ d	试块 标号	涂料	时间/ min	养护 条件
1	0.02 ~ 0.04	50	70	C45	有	120	加热
2	0.02 ~ 0.04	150	70	C45	有	120	加热
3	0.05 ~ 0.1	50	50	C45	无	120	标准
4	0.05 ~ 0.1	50	50	C45	有	120	加热
5	0.05 ~ 0.1	150	50	C45	无	120	标准
6	0.05 ~ 0.1	150	50	C45	有	120	加热
7	0.15 ~ 0.4	50	40	C45	无	120	标准
8	0.15 ~ 0.4	50	40	C45	有	120	加热
9	0.15 ~ 0.4	150	50	C45	无	120	标准
10	0.15 ~ 0.4	150	40	C45	有	120	加热
11	0.5 ~ 0.85	50	40	C45	无	120	标准
12	0.5 ~ 0.85	50	40	C45	有	120	加热
13	0.5 ~ 0.85	150	40	C45	无	120	标准
14	0.5 ~ 0.85	150	70	C45	有	120	加热
15	0.5 ~ 0.85	150	70	C45	有	120	日照 30d
16	0.5 ~ 0.85	150	70	C45	有	120	养护加热
17	0.5 ~ 0.85	150	47	C45	有	120	室内 15d

4.2 泥沙粒径对涂层抗冲磨的影响

不同的泥沙粒径对于涂层试件的冲磨情况见图 3、图 4。由图 3 对比工况 4、8、12 和图 4 对比工况 6、10、14,整个试验过程中,随着泥沙粒径增大对应的试块及涂层的抗冲磨强度变小,表明随着泥沙粒径增大,磨损量增加,抗冲磨强度减小。而小粒径泥沙颗粒对应的试块磨损量较小,即小粒径泥沙对本涂层的冲磨破坏作用明显减弱。图 3 中工况 8 的抗磨强度是工况 4 的 25.12%,工况 12 的抗冲磨强度仅达到工况 4 的 23.08%。图 4 中工况 9 的抗冲磨强度是工况 6 的 29.65%,工况 14 的抗冲磨强度仅达到工况 6 的 25.77%。对比图 3、图 4 各工况下试件有无涂层的试验结果,在小粒径泥沙情况下,有涂层试件抗磨强度较无涂层试件抗磨强度提高了 59.65%,其它工况下由于泥沙粒径增大,有涂层试件抗冲磨强度较无涂层提高了 17.54% 左右。都体现出涂层对混凝土的保护作用。

4.3 含沙量对涂层抗冲磨的影响

不同含沙量对涂层抗冲磨的影响主要从以下几种情况展开研究:

从图 5 可以看出,试块前期磨损量增加较快,进行到试验中后期,涂层磨损量很小,部分时段磨损量几乎没有,体现在图上曲线斜率近乎不变,有涂层抗冲磨强度较无涂层抗冲磨强度提高了 112.35%,可以看出在此工况下涂层的抗冲磨特性表现良好。

由图 6 对比工况 4、6 和工况 3、5 的试验结果可以看出,抗冲磨强度随着泥沙含量的增加而减小,工况 6 的抗冲磨强度仅达到工况 4 的 19.85%,表明在小含沙量情况下涂层的抗冲磨强度显著增强,同时对工况 3、4 和工况 5、6 可以看出随着泥沙含量增加,涂层的保护作用减弱。工况 4 涂层抗磨强度随着时间增长较快,而工况 6 涂层的抗磨强度随着时间的持续增长,强度增长趋势略有降低。

由图 7 对比工况 8 和 10 的试验结果可以看出,初始阶段工况 10 抗冲磨强度 $12.5 \text{ h}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ 为工况 8 抗冲磨强度 $18.4 \text{ h}/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-2})$ 的 67.93%,进行到试验后期由于泥沙含量的持续影响,工况 10 抗冲磨强度仅为工况 8 的 46.38%。对比工况 7 和 8 的试验结果可以看出,有涂层情况下全程抗磨强度初期增长较快,后期磨损强度趋于稳定,无涂层试件试验全程抗磨强度增长较平稳。对比工况 9 和工况 10 同样可以看出涂层对混凝土试块的保护作用。

由图 8 同样可以看出小含量泥沙抗磨的绝对优势所在,对比工况 12 和 14 的试验结果,可以看出工

况 14 的磨损强度仅为工况 12 的 35.35%。对比工况 11 和 12 可以看出,涂层试件在抗磨后期保护作用较明显,明显优于无涂层。比较工况 13 和 14,由于泥沙粒径较大,泥沙含量较高,影响了涂层性能的发 挥,试验后期涂层的保护作用基本不存在。

4.4 养护条件对涂层抗冲磨性能的影响

由图 9 结果可以看出,在工况 17 的养护条件下涂层的抗磨效果最强,室内温度养护就可以达到很

好的抗磨效果;工况 16 抗磨效果一般,其抗磨强度仅达到工况 17 的 55.48%,说明加热涂层表面的工艺方法对强化涂层性能作用很小;工况 15 的抗磨效果最差,其抗磨强度仅达到工况 17 的 47.15%,说明涂层养护阶段阳光照射对涂层的性能影响较大,一定程度上减弱了涂层的抗磨性能。因此,通过对比分析认为室内养护为 GNF 涂料涂层最适宜的养护条件。

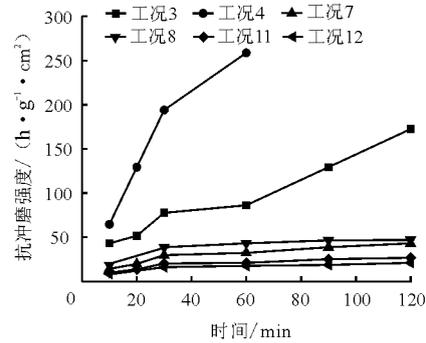


图 3 含沙量 50 kg/m³ 抗冲磨强度

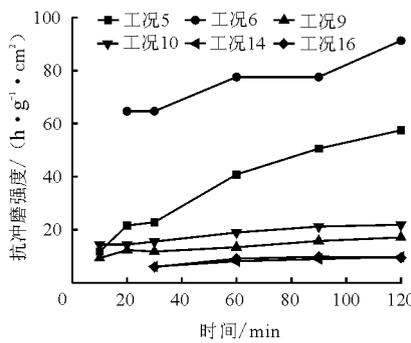


图 4 含沙量 150 kg/m³ 抗冲磨强度

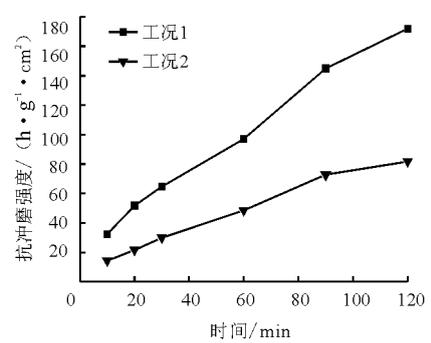


图 5 泥沙粒径同为 0.02~0.04 mm 时各试块抗冲磨强度

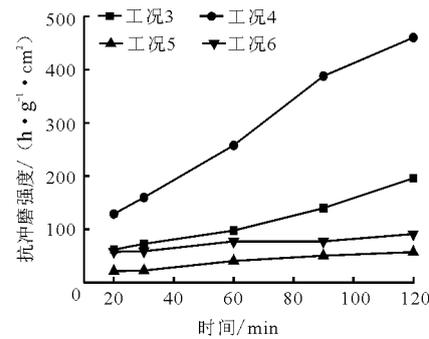


图 6 泥沙粒径同为 0.05~0.1 mm 时各试块抗冲磨强度

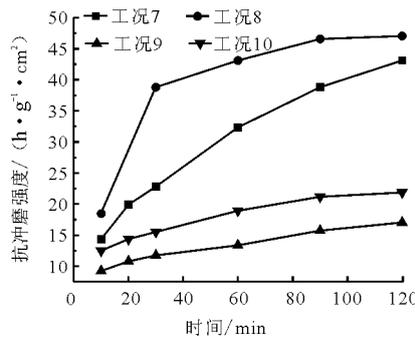


图 7 泥沙粒径同为 0.15~0.4 mm 时各试块抗冲磨强度

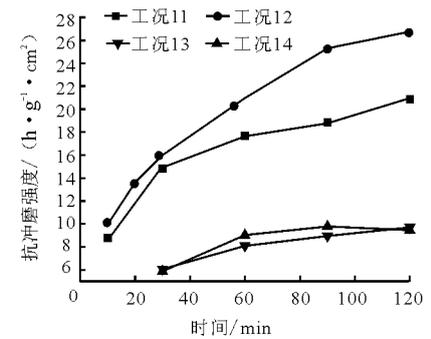


图 8 泥沙粒径同为 0.5~0.85 mm 时各试块抗冲磨强度

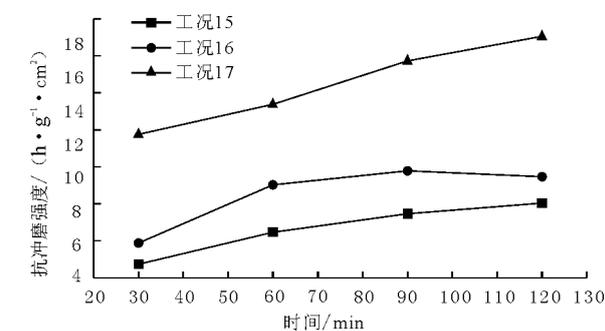


图 9 不同养护条件下涂层抗冲磨强度

5 结 论

(1)随着泥沙粒径的增大,GNF 涂料涂层的磨损量有较大增加,而小粒径泥沙颗粒对于涂层的磨损量较小,泥沙粒径在 0.02~0.04 mm 之间时,涂

层的抗冲磨效果最好;在一定泥沙含量范围内,当泥沙含量增加时,则磨损量增大,抗冲磨强度减弱。

(2)根据涂料的性质,模拟了 3 种涂层养护条件,发现室内养护条件与混凝土基底的复合性较好。从工程方面考虑,将其运用到复杂的水工建筑物上时,可以很好地保持建筑物的基本形态,而就施工方法而言,多采用人工涂抹,方便快捷,对于其推广使用起到了很大的促进作用。

(3)鉴于抗冲蚀问题的复杂性,至今为止尚未有一套广泛认同的量化公式,对于本问题的研究还须更深入地探讨。作为一种新型抗冲磨材料,GNF 涂料涂层若要大规模地应用于水电站过水建筑物,还需要进行更深一步的技术研究和应用试验。

(下转第 196 页)

减小,后浇界面裂缝显著,但后浇段内部裂缝极少。

(2)UHPC 装配梁加载过程中符合平截面假定,搭接长度从 $15d$ 开始可以认为钢筋与混凝土没有发生滑移状况。

(3)UHPC 装配梁承载力实测值与计算值的比值均大于 1.36,具有足够的承载力安全储备,满足工程要求,增加钢筋搭接长度对提高 UHPC 装配梁的开裂荷载影响不大。

(4)UHPC 装配梁在开裂荷载、屈服荷载、极限荷载等方面均明显优于普通混凝土装配梁,搭接长度为 $10d$ 时,承载力和变形能力已和现浇混凝土对比梁比较接近,且随着搭接长度增加,性能提高不大,因此当搭接长度为 $10d$ 时,已能够满足设计和施工需求。

参考文献:

- [1] 刘琼,李向民,许清风. 预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J]. 施工技术,2014,43(22):9-14+36.
- [2] 徐海滨,邓宗才. 超高性能混凝土在桥梁工程中的应用[J]. 世界桥梁,2012,40(3):63-67.
- [3] Graybeal B, Tanesi J. Durability of an ultra-high performance concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2007,19(10):848-854.
- [4] 宋国华,霍达,王东炜,等. 装配式大板结构竖向齿槽

接缝受剪承载力设计[J]. 土木工程学报,2003,36(11):61-64.

- [5] 杨剑,方志. 预应力超高性能混凝土梁的受弯性能研究[J]. 中国公路学报,2009,22(1):39-46.
- [6] 张大长,支正东,卢中强,等. 外壳预制核心现浇 RC 梁抗弯承载力的试验研究[J]. 工程力学,2009,26(5):164-170.
- [7] 李坚,陆元春. 预制节段混凝土桥梁的设计与工程实践[C]//. 第七届后张拉预应力学术交流会,2002.
- [8] 刘昌永,王庆贺,王玉银,等. 带钢接头的装配式钢筋混凝土梁受弯性能研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(S1):208-214.
- [9] 徐海滨,邓宗才. UHPC 梁开裂弯矩和裂缝试验[J]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学学报,2014,46(4):87-92.
- [10] 孙文彬,田洪斌,王锦力. 装配预制梁抗弯承载力试验研究[J]. 工业建筑,2015,45(2):57-61.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范 GB 50010-2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [12] 邓宗才,王义超,肖锐,等. 高强钢筋 UHPC 梁抗弯性能试验研究与理论分析[J]. 应用基础与工程科学学报,2015,23(1):68-78.
- [13] 冯素丽. 钢筋超高性能混凝土梁延性性能试验研究[D]. 西安:长安大学,2014.

(上接第 188 页)

参考文献:

- [1] 顾四行. 我国有关水机磨蚀研究和防护措施[J]. 水力发电学报,1991,10(3):27-38.
- [2] 王金国. 水工建筑物的破坏及防治措施研究[D]. 成都:四川大学,2002.
- [3] 郝枫楠. 水工混凝土抗冲磨性能评价方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [4] 王志高. 我国水轮机磨蚀的现状和防护措施的进展[J]. 水利水电工程设计,2002,21(3):1-4.
- [5] 彭恩高. 材料的含沙水流冲蚀磨蚀性能研究[D]. 北京:机械科学研究总院,2006.
- [6] Gandhi B K, Singh S N, Seshadri V. Study of the parametric dependence of erosion wear for the parallel flow of solid-liquid mixtures[J]. Tribology International, 1999, 32(5):275-282.
- [7] 蒋硕忠. 聚合物抗磨蚀材料的研究与应用[J]. 长江科学院院报,1993,10(2):73-77.
- [8] Woodford D A. Cavitation - Erosion - Induced Phase Transformations in Alloys[J]. Metallurgical Transactions, 1972(3):1137-1145.
- [9] 姚启鹏. 泥沙粒径级配材料磨蚀影响的试验研究[J]. 水力发电学报,1997,16(1):87-94.
- [10] 余江成,姚启鹏,吴剑. 河流泥沙颗粒特性对磨蚀影响的研究[J]. 水利水电技术,1999,30(11):37-39.
- [11] 黄细彬. 高速含沙掺气水流及磨蚀机理的研究[D]. 南京:河海大学,2001.
- [12] 邓军,杨永全,沈焕荣,等. 水流含沙量对磨蚀的影响[J]. 泥沙研究,2000(4):65-68.
- [13] 程则久. 空化和磨蚀中临界含沙量的试验研究[J]. 水利水电技术,1990,21(2):57-63.