

# 跌坎型底流消能工混凝土底板冲磨破坏机理分析

张闻辉<sup>1</sup>, 王海军<sup>1</sup>, 郑雪<sup>1</sup>, 钟志镭<sup>2</sup>

(1 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051;

2 中国水电顾问集团 昆明勘测设计研究院, 云南 昆明 650051)

**摘要:** 通过跌坎型底流消能工水力学试验和理论分析, 研究了跌坎型底流消力池内底滚回流区、冲击区、附壁射流区水力特性及混凝土底板破坏机理, 分析底板冲磨破坏类型分为大角度和小角度冲磨, 并且分析比较了 3 个区域内临底流速之间的关系, 得出临底流速的计算公式。

**关键词:** 消力池; 水力特性; 破坏机理; 脉动压力

**中图分类号:** TV 135. 2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)01-0074-05

## Erosion and Destroy Mechanism of Concrete Baseplate in Step-down Energy Dissipater

ZHANG Wen-hui<sup>1</sup>, WANG Hai-jun<sup>1</sup>, ZHENG Xue<sup>1</sup>, ZHONG Zhi-lei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Electric Power Engineering Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China

2. Kunming Engineering Corporation HydroChina, Kunming 650051, China)

**Abstract** Through mechanical test and theoretical research, the hydraulic characteristics of the flow near the floor of roll reflux impact and wall jet regions in the step-down energy dissipater are made clear. The erosion and destroy mechanism of the concrete baseplate are studied. The erosion and destroy is classified into large angle and small angle types. The relationship between the velocities of the flow near the floor in three different areas is also analyzed. A formula to calculate the velocity of the flow near the floor is finally put forward.

**Key words** stilling basin; hydraulic characteristic; destroy mechanism; fluctuating pressure

### 0 引言

跌坎型底流消能工是建立在常规底流消能工基础上的一种消能方式。它能有效地解决传统底流消能工带来的消力池的脉动压强和临底流速高的问题, 随着近年来跌坎型底流消能工运用到实际工程中, 消力池底板抗冲耐磨显得越来越重要。混凝土底板的破坏跟水流流速大小和水中所含硬质泥沙等有着紧密的联系, 水流流速超过混凝土的抗冲流速就会引起混凝土的破坏, 且含有硬质泥沙的高速水流会加速混凝土破坏, 发生冲磨破坏后的混凝土底板改变了过流边壁的平整性, 出现低压区, 容易诱发空化, 产生空蚀破坏。因此对于混凝土冲磨研究就显得尤为重要。冲磨破坏又分为悬移质破坏和推移质破坏 2 种。而目前针对跌坎型底流消能工底板抗冲耐研究较少, 通过跌坎型底流消能工水力学试验和理论分析, 对消力池 3 个不同水流运动区域的水力特性及混凝土底板破坏机理、不同区域临底流速之间进行了研究。

### 1 混凝土冲磨破坏机理

在水流经过表孔下泄到消力池之前, 推移质泥沙已经沉降通过冲沙底孔排出, 在一般情况下消力池内的含沙水流应该以悬移质为主, 所以在研究消力池底板破坏机理时应该重点研究悬移质磨损破坏机理。

收稿日期: 2009-03-18 基金项目: 云南省自然科学基金(项目编号: 2006A0018M)

第一作者简介: 张闻辉(1983-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 水利水电工程. E-mail: zhangwenhui2003@

在含有泥沙等硬质颗粒的高速水流, 对混凝土过流边壁是一种纯机械式的的冲击、磨损破坏. 由于高速水流有很强的紊动作用, 且悬移质泥沙体积相对较小, 能够与水体均匀的掺混, 且伴随水流一起运动, 这样就形成了固液混合均匀的 2 相流. 当高速水流与悬移质均匀掺混后, 形成的固液混合均匀的两相流冲击到混凝土过流壁面时, 水流对过流边壁的作用表现为磨蚀、切削和冲撞. 含有悬移质的高速水流最初以冲磨的形式破坏消力池过流边壁, 当随着长时间的冲磨破坏使得过流边壁出现形状不同、大小不一的磨损坑. 同时磨蚀坑使得过流边界的水流结构产生恶化, 在混凝土过流边壁上形成尺度、形状不同的涡体, 涡体的出现便有可能产生空蚀破坏, 这时含有悬移质的高速水流对混凝土过流边壁的破坏已经不是单纯的冲磨破坏.

研究在跌坎型底流消能工中消力池内的含沙水流对消力池底板的冲刷破坏, 试验<sup>[1]</sup>和实际经验表明混凝土冲刷破坏多发生在高流速区域, 含沙水流流速越高对混凝土地板的冲刷破坏能力也就越强.

## 2 临底流速的特性分析

在高速水流冲击状态下含沙水流对混凝土材料冲击磨损的研究, 可从水流对混凝土底板冲击角度的大小分为大角度和小角度冲击进行研究, 跌坎型底流消能工消力池内的水流结构按射流流向分为 5 个宏观区域, 分别为: 淹没射流区、底滚回流区、冲击区、附壁射流区和上滚回流区. 如图 1 所示.

在含沙高速水流小角度冲刷中, 悬移质泥沙颗粒均在几  $\mu\text{m}$  和几  $10\mu\text{m}$  之间, 随着高速水流一起运动, 并以较小的角度冲击混凝土过流壁面, 混凝土材料破坏以硬质泥沙的小角度微切削和水平磨损为主. 大角度问题主要表现为对混凝土表面的冲撞破坏.

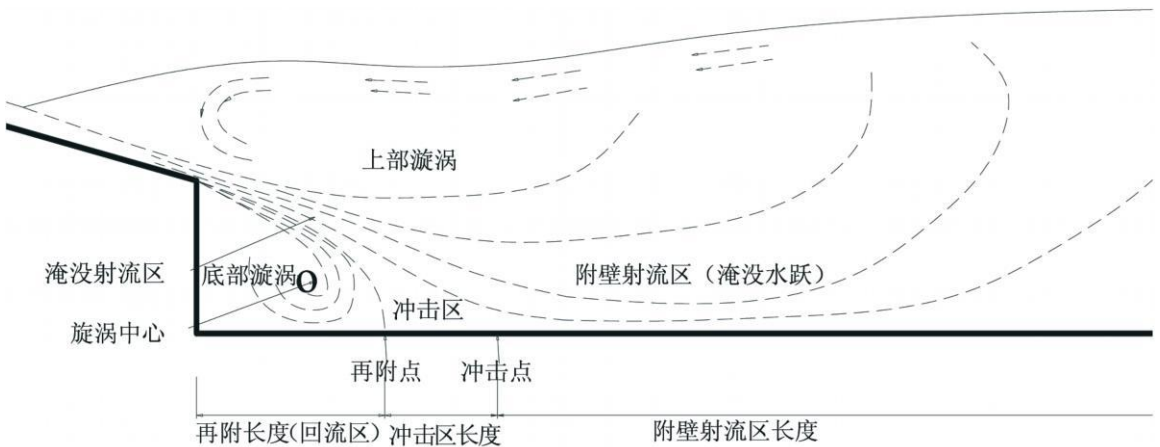


图1 跌坎型底流消能工流速分布示意图  
Fig.1 The velocity distribution of step-down bottom energy dissipater

### 2.1 底滚回流区分析

在跌坎型底流消力池底滚回流区内, 主流以淹没射流形式进入消力池水体, 由于射流的卷吸作用, 使得射流沿程卷吸坎后水体, 在跌坎后形成强烈的横轴漩涡, 通过实验与理论分析得知, 跌坎后的底滚回流区内水体运动大部分情况下迹线呈椭圆形状, 只有在特定的坎深和入池角度才有可能为圆形, 如图 2 所示. 为了便于分析, 可假定椭圆方程  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1^{[2]}$  来表示底滚回流漩涡外缘运动迹线方程, 通过实验观察在底滚回流区水体产生和主流反向的漩涡, 水体各质点对底板冲击角度大, 图 2 中所示水流与底板之间冲刷角度为  $\theta_1 \sim \theta_2$  之间变化, 所以底滚回流区内的破坏机理属于大角度冲刷碰撞破坏.

设 A 点为最大临底流速对底板的冲击点, 则  $u_A$  为底滚回流区内的最大临底流速, 且  $u_A = ku_0 \frac{l}{d}$ , 式中  $k$  为比例系数,  $u_0$  为水流入池流速, 其中随着坎深  $d$  的增大, 曲线逐渐平缓,  $k$  值将逐渐减小.

## 2 2 附壁射流区特性分析

在跌坎型底流消力池附壁射流区,射流冲击消力池底板后流向发生改变,形成沿着消力池底板的贴壁射流,把此区域称为附壁射流区。附壁射流区上边界水体沿程不断卷吸 4 周水体产生掺混,底部边界水体通过与混凝土底板间的摩擦作用向上发展,因此主流通过上部掺混和下部的摩擦而沿程扩散,这种沿程不断的掺混和摩擦作用,使得消力池水体在附壁射流的上部形成宏观上的面部漩涡。

跌坎型底流消力池附壁射流区内,根据水流形态属于小角度冲击破坏,因此以水平方向的作用力分量为,垂直方向的分量可以忽略,混凝土表面剪切力是产生磨损破坏的主要原因,所以混凝土剪切强度是设计跌坎型底流消能工消力池附壁射流区混凝土底板的关键。

$$f_v = 0.38 f_{cu}^{0.57} \quad (1)$$

$f_{cu}$ : 混凝土的抗压强度,  $f_v$ : 混凝土的抗剪强度<sup>[3]</sup>。

跌坎型底流消力池附壁射流区内,水流对底板的冲刷破坏以小角度冲击磨损破坏为主,设计混凝土底板时可以认为在附壁射流与底板之间力的关系为:当含沙水流对底板的边界剪切力大于底板混凝土材料的抗剪剪切力时,可引起底板破坏。

$$f_0 > f \quad (2)$$

$$\text{且} \quad f = f_v A \quad (3)$$

$$f_0 = \tau_0 A \quad (4)$$

$f_0$ : 含沙水流对底板边界剪切力,  $f$ : 混凝土的抗剪力,  $\tau_0$ : 边界切应力。

在计算抗冲流速时可假设混凝土抗剪力等于附壁射流区内的水流断面上的边界切应力乘以面积  $A$ , 计算时令 (2) = (3) 得:

$$f_0 = f = \tau_0 A = f_v A \quad (5)$$

对于附壁射流,任何断面上的边界切应力为<sup>[4]</sup>:

$$\tau_0 = c_f \frac{\rho u_{max}^2}{2g} \quad (6)$$

$$c_f = \frac{0.0565}{[u_{max} (\frac{\delta}{\nu})]^{0.25}} \quad (7)$$

在计算过程中水流对底板边界剪切力为  $f_0 = \tau_0 A$ , 在 (5) 计算过程中  $\tau_0 A = f_v A$  公式左右两边约去面积计算既得  $\tau_0 = f_v$ , 且由 (6), (7) 得:

$$u_{max}^{1.75} = \frac{2\tau_0 g (\frac{\delta}{\nu})^{0.25}}{0.0565 \gamma} \quad (8)$$

$$Re_x = \frac{u_{max} x}{\nu} \quad (9)$$

$$\delta = \frac{0.37x}{R^{0.2} e_x} \quad (10)$$

由 (8), (9), (10) 得:

$$u_{max}^{2.2} = \frac{27.6 f_v g \nu^{0.15}}{x^{0.15} \gamma} \quad (11)$$

$A$ : 底板面积,  $C_f$ : 磨阻系数,  $u_{max}$ : 最大抗冲流速,  $\nu$ : 浑水的运动粘滞系数,  $\gamma$ : 浑水的容重,  $x$ : 从水流入射到发生冲刷破坏的距离,  $Re_x$ : 雷诺数,  $\delta$  为边界层厚度。

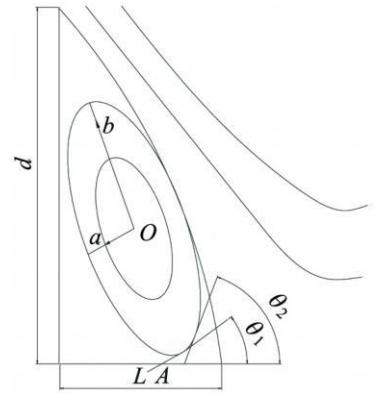


图2 消力池内底滚回流区水流结构图  
Fig.2 The characteristic of flow in bottom of roll reflux region

### 2.3 冲击区特性分析

跌坎型底流消力池冲击区内, 主流冲击混凝土底板后的使得水流流速迅速减小, 方向产生转变, 带有大量动能的射流直接冲击到消力池底板上, 由于冲击后射流的动能得到消散和转化, 使得射流流速迅速降低, 混凝土底板压力急剧增大, 因此冲击区是消力池中消能的主要区域, 但同时也有可能引起严重的冲刷与空蚀破坏。

跌坎型底流消力池冲击区内水流与过流壁面之间呈较大角度冲击, 有时甚至达到垂直冲击, 水流中的泥沙无论颗粒大小都主要以冲击方式作用于混凝土底板表面, 具有一定动能的硬质沙粒在大角度的条件下, 不断冲击混凝土材料表面, 使其产生严重磨损。

在冲击区内, 水流从消力池入口射入至水流冲击底板时之间的合力为  $\sum F$ , 如果  $\sum F$  大于混凝土所能承受的最大抗冲击力时可引起冲击区内混凝土底板破坏。

根据动量定理, 取射流从入池到即将要碰撞到消力池底板之间的水体作一流段来研究, 假设水流入池流量为  $Q$ , 水流入池流速为  $V_1$ ,  $V_2$  为射流到达消力池混凝土底板的最大临底流速, 且底滚回流区和附壁射流区内水体自身做有规律的、宏观上的回流运动, 可近似的认为在入池条件不变的条件下, 这 2 个区域内的水体体积保持不变, 也就等于射流流量  $Q$  大小沿程不变, 因此可建立射流从消力池入口至混凝土底板之间的动量方程, 为方便计算统一把动量修正系数  $\beta = 1$

$$\rho Q \beta (V_2 - V_1) = \sum F \tag{12}$$

且  $Q = V_1 A$ .

$$\sum F = f_{ca} A \tag{13}$$

由 (1), (12), (13) 得

$$V_2 = \frac{5.45 \tau_0^{1.75} + \rho V_1^2}{\rho V_1} \tag{14}$$

### 3 不同区域内临底流速之间的关系

在混凝土底板抗冲流速计算中, 可先假设一水流流速  $u$ , 当消力池临底流速大于  $u$  时即可引起混凝土底板的冲磨破坏, 此时称  $u$  值为抗冲流速。在跌坎型底流消能工底滚回流区、冲击区、附壁射流区内最大临底流速  $u_1, u_{max}, u_2$  大小各不相同, 可找出这 3 个不同流速所对应的关系。临底流速越大混凝土底板发生冲磨破坏的几率可能就会更高, 根据 3 个区域内临底流速大小不同而采用不同的强度的混凝土, 可使工程更为经济、合理。

图 3 为在 4 个不同工况下, 临底流速沿底板长度增加过程中的流速分布图, 由于底滚回流区内临底流速流速方向与冲击区、附壁射流区相反, 再由图 3 数据可知底滚回流区内流速大小不是最大的, 那么底板上临底流速最大值可能出现在冲击区或者附壁射流区内, 根据能量守恒定理,  $E = h + \frac{\rho u^2}{2g}$  得, 临底流速在冲击区和附壁射流区内由于消能的作用, 令  $h$  保持不变, 水流沿底板长度增加临底流速  $u$  必然下降。由图 4 得, 射流射入消力池水体后在淹没射流区发生掺混使得

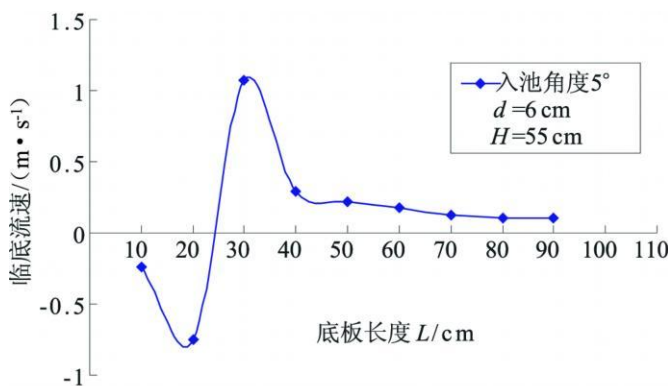


图3 临底流速分布图  
Fig.3 The bottom velocity of distribution map

水体纵向扩散, 并且射流与消能水体之间强烈的掺混、剪切以及形成的紊动涡体, 使得主流流速迅速减小。在冲击区内主流冲击底板消能后, 使得流速急剧减小方向转向, 最大临底流速产生在冲击区主流后部, 可视为 B 点, 临底流速从 B 到 A 区域内指向跌坎面为反方向, 且临底流速沿程减小; 冲击区内从 B 到 C 区域内由于消能

的作用, 临底流速值也会沿程减小, 所以底板上的最大临底流速值应该发生在冲击区内。

基于跌坎型底流消力池底滚回流区、冲击区和附壁射流区内水力特性各不相同, 对混凝土底板冲刷破坏机理也不相同, 各区临底流速不同, 因此在设计消力池混凝土底板时就可以对不同的水流区域采用不同强度的混凝土, 使整个工程更为经济、合理。

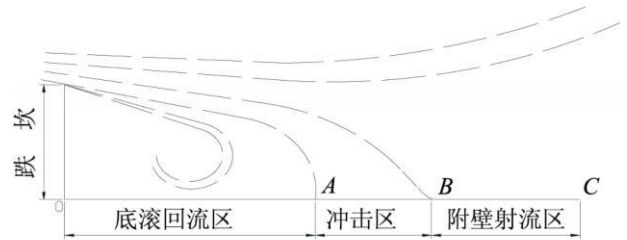


图4 射流冲击区示意图  
Fig.4 Impulse area of flow jet

#### 4 结 语

1) 随着跌坎型底流消能工在实际工程中的运用, 研究跌坎型底流消能工消力池的混凝土底板抗冲刷破坏机理的越来越重要。

2) 论文研究了跌坎型底流消能工消力池内混凝土底板抗压强度与临底流速之间的关系, 研究表明底滚回流区内水流迹线呈椭圆型分布, 水流与混凝土底板属于大角度冲刷, 附壁射流区内水流对消力池混凝土底板为小角度冲刷, 冲击区内水流对消力池混凝土底板为大角度冲刷, 根据实验初步探讨了在设计过程中可以对不同区域采用不同强度的混凝土, 使整个工程更为经济、合理。

#### 参考文献:

- [1] 王海军, 赵伟, 杨红宣, 等. 坎深和入池角度对跌坎型底流消能工水力特性的影响的试验研究[J]. 昆明理工大学学报:理工版, 2007, 32(10): 87-90
- [2] 王海军, 梅伟, 张强. 跌坎式底流消能工坎后横轴漩涡水力特性研究[J]. 水利水电技术, 2008 39(5): 23-25
- [3] 石国柱, 马彦飞, 徐晓勇. 混凝土剪切强度指标研究[J]. 安阳师范学院学报, 2006(5): 140-143
- [4] 郭子中. 消能防冲原理与水力设计[M]. 北京: 科学出版社, 1982 349-350

(上接第 41 页)

#### 参考文献:

- [1] Johnson E, Johansen A, Dahm en U, et al. Shapes and Sizes of Nanoscale Pb Inclusions in Al [J]. Materials Science and Engineering 2001 187-193
- [2] Zhao J Z, Ratke L. Microstructure Evolution of Immiscible Alloys During Cooling Through the Miscibility Gap [J]. Modelling Simul Mater Sci Eng 1998 6 123-139
- [3] Jerome F Cole, Frank E Coodwin. The Development and Potential Application of Al-Pb Alloy [J]. JOM, 1990(6): 41-43
- [4] Inoue A, Yano N, Matsuzaki K, et al. Microstructure and Superconduction Properties of Melting-Quenched Insoluble Al-Pb and Al-Pb-Si Alloys [J]. J Mater Sci 1987, 22 123-131
- [5] Bangerth H, Eisenmenger-Sittner C, Bergauer A. Deposition and Structural Properties of Two-Component Metal Coatings for Tribological Applications [J]. Surface and Coatings Technology, 1996 80 162-170
- [6] 王阡. Al-Mx 金属多层膜的红外特性研究 [J]. 材料导报, 2004 18(4): 239-241
- [7] Ghdik kh N T, Bogatyrenko S I, Kryshtal A P, et al. Melting Point Lowering of Thin Metal Films (Me = In, Sn, Bi, Pb) in Al/Me/Al Film System [J]. Applied Surface Science, 2003 219 338-346
- [8] Zhang L, Jin ZH, Zhang LH, et al. Superheating of Confined Pb Thin Films [J]. Phys Rev Lett 2000 85(7): 1484-1487
- [9] 张明, 于文, 刘日平, 等. Ag/B 多层膜的结构研究 [J]. 科学通报, 1997 42(10): 1059-1062
- [10] 郭诗玫. Al/Pb 纳米多层膜组织结构与红外性能研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006 36-49
- [11] Hong Wang, Zaluzec M, J Rigsbee JM. Microstructure and Mechanical Properties of Sputter-Deposited Cu1-XTax Alloys [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 1997 28(3): 917-925
- [12] 郑伟涛, 等. 薄膜材料与薄膜技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004 167-168
- [13] Eisenmenger-Sittner C, Bangerth H, Tomastik C, et al. Solid State Diffusion of Sn in Polycrystalline Al Films [J]. Thin Solid Films 2003 97-102
- [14] Eisenmenger-Sittner C. The Application of Rate Equations to Describe Nucleation and Growth on Rough Substrates: Tin and Lead on Aluminum [J]. Journal of Crystal Growth 1999 441-452