

ICS 27.140
CCS K 55

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL/T 814—2021

水轮机过流部件磨损试验方法

Method of abrasive erosion test for flow passage
components of hydraulic turbines

2021-11-18 发布

2022-02-18 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部

关于批准发布《水土保持信息管理技术规程》等 11 项
水利行业标准的公告

2021 年第 12 号

中华人民共和国水利部批准《水土保持信息管理技术规程》(SL/T 341—2021) 等 11 项为水利行业标准, 现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水土保持信息管理技术规程	SL/T 341—2021	SL 341—2006	2021. 11. 18	2022. 2. 18
2	河道采砂规划编制与实施监督管理技术规范	SL/T 423—2021	SL 423—2008	2021. 11. 18	2022. 2. 18
3	水资源监测数据传输规约	SL/T 427—2021	SL 427—2008	2021. 11. 18	2022. 2. 18
4	堰塞湖风险等级划分与应急处置技术规范	SL/T 450—2021	SL 450—2009 SL 451—2009	2021. 11. 18	2022. 2. 18
5	建设项目水资源论证导则 第 5 部分: 化工行业建设项目	SL/T 525.5—2021		2021. 11. 18	2022. 2. 18
6	建设项目水资源论证导则 第 6 部分: 造纸行业建设项目	SL/T 525.6—2021		2021. 11. 18	2022. 2. 18
7	水利通信工程质量评定与验收规程	SL/T 694—2021	SL 439—2009 SL 694—2015	2021. 11. 18	2022. 2. 18
8	水轮机过流部件磨损试验方法	SL/T 814—2021		2021. 11. 18	2022. 2. 18
9	水泵磨蚀防护技术规范	SL/T 815—2021		2021. 11. 18	2022. 2. 18
10	电子证照 取水许可证	SL/T 816—2021		2021. 11. 18	2022. 2. 18
11	抗旱效益评估技术导则	SL/T 817—2021		2021. 11. 18	2022. 2. 18

水利部

2021 年 11 月 18 日

<https://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 试验方法与试验条件选择	2
5 试验方法及参数测量	2
5.1 一般规定	2
5.2 圆盘式磨损试验	2
5.3 旋转喷射磨损试验	5
5.4 参数测量	6
6 磨损预估与评价	8
6.1 磨损预估	8
6.2 磨损评价	11
附录 A (资料性) 河流泥沙常见矿物种类及硬度	12
附录 B (资料性) 工程应用实例	13
B.1 工程概况	13
B.2 机组主要参数	13
B.3 电站泥沙资料	13
B.4 试验方法与试验结果分析	13
B.5 建库后泥沙磨损能力估算	14
B.6 主要磨损部位的磨损量估算	14

<https://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

前 言

根据水利行业标准制修订计划安排，按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的要求，编制本标准。

本标准共6章2个附录，主要技术内容有：

- 试验方法与试验条件选择；
- 试验方法及参数测量；
- 磨损预估与评价。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部国际合作与科技司

本标准解释单位：水利部国际合作与科技司

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：余江成 周 叶 刘 娟 曹登峰 江翠伟

本标准审查会议技术负责人：王福军 游 超

本标准体例格式审查人：陈 昊

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条2号；邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供以后修订时参考。

水轮机过流部件磨损试验方法

1 范围

本标准规定了水轮机过流部件材料磨损试验方法。

本标准适用于水轮机过流部件抗泥沙磨损性能测定与评价。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本标准必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本标准；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T 2900.45 电工术语 水电站水力机械设备

GB/T 10969 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机通流部件技术条件

GB/T 29403 反击式水轮机泥沙磨损技术导则

GB/T 50159 河流悬移质泥沙测验规范

3 术语和定义

GB/T 2900.45 和 GB/T 29403 界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

试验时段 test interval

在保证试验泥沙循环使用效果及实验室条件下，试验泥沙一次性使用的时间。

3.2

泥沙磨损 silt abrasion

因水流携带泥沙引起的对过流部件表面所造成的材料破坏和流失。

3.3

磨损量 amount of abrasion

水流携带泥沙对过流部件表面所造成的材料流失量。磨损量可用磨损深度、磨损面积、质量损失、体积损失等表示。

3.4

磨损率 abrasion rate

在给定磨损条件下单位时间内材料的磨损量。

3.5

单位磨损率 unit abrasion rate

设定含沙量为 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 时的磨损率。

3.6

粒径 grain size

泥沙颗粒的大小，用毫米表示。

3.7

中值粒径 median grain size

粒径级配曲线上小于该粒径泥沙质量占泥沙总质量 50% 对应的粒径，用毫米表示。

3.8

粒径相对磨损系数 relative abrasion coefficient of grain size

在采用 3 组及以上不同级配泥沙的磨损试验中，以中值粒径最小的级配泥沙的磨损量为基准，用以表征某级配泥沙的磨损量相对于基准的倍数。

3.9

抗磨倍数 anti-abrasion coefficient (relative abrasion resistance)

相同磨损条件下，基准材料磨损量与试验材料磨损量的比值。

4 试验方法与试验条件选择

4.1 试验方法包括圆盘式磨损试验方法与旋转喷射磨损试验方法：

- a) 圆盘式磨损试验方法的试验装置为封闭式循环系统，试验段内试件表面的磨损状态为平面绕流磨损，试验结果可用于反击式水轮机的磨损预估。
- b) 旋转喷射磨损试验方法的试验装置为非封闭式循环系统，试验段内试件表面的磨损状态为冲击磨损，试验结果可用于冲击式水轮机的磨损预估。

4.2 试验条件如下：

- a) 试验装置水力磨损条件宜与磨损部件（部位）的水力磨损条件相似。
- b) 试验水流速度、含沙量、泥沙级配、矿物成分及颗粒作用冲角等参数宜相近。河流泥沙常见矿物种类及硬度见附录 A。
- c) 试件材料宜与原型水力机械过流部件相同。
- d) 试验时间受限时，可适当加大试验含沙量。若试验含沙量较过机含沙量相差较大时，可进行含沙量与磨损的关系试验。

4.3 在新材料开发研制阶段，可采用石英砂进行新材料抗磨性对比试验，宜采用 270 目或更细的石英砂，细石英砂的粒径更接近河流泥沙且可以避免粗石英砂在试验中破碎对试验结果造成的影响。

5 试验方法及参数测量

5.1 一般规定

5.1.1 试验装置循环系统应符合下列要求：

- a) 设备与管路布置有利于循环水流动通畅，避免泥沙淤积。封闭式循环系统保持试验过程中试验段内部压力不出现负压。
- b) 设冷却设备，试验时水温不高于 35℃。
- c) 管路内水流速度大于 4m/s。当循环系统稳压罐水流速度低于 4m/s 时，加设搅拌泵搅拌。
- d) 循环系统低处设沉沙池，底部设排空阀。

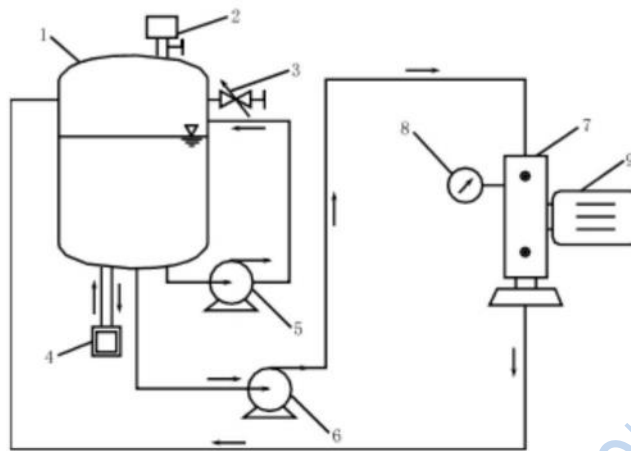
5.1.2 试验主要参数应符合运行稳定及测量精度要求。

5.1.3 试件表面粗糙度应与原型水力机械过流部件表面粗糙度相同，表面粗糙度宜符合 GB/T 10969 的规定。试件装配后的表面平面度应不大于 0.05mm。

5.2 圆盘式磨损试验

5.2.1 工作原理

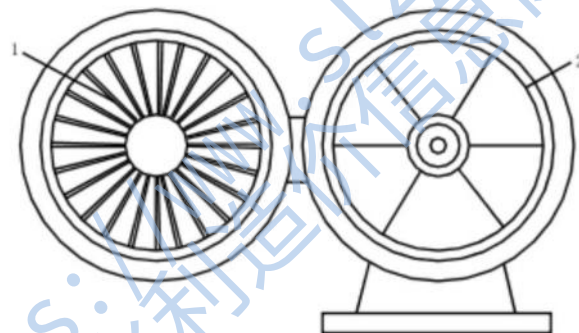
圆盘式磨损试验装置系统示意图如图 1 所示，试验装置主体为转盘室，内设有圆盘与阻流栅，如图 2 所示。试验时圆盘在充满含沙水的圆盘室中旋转，形成圆盘盘面与含沙水的相对运动，使得盘面即试件磨损。通过测量试件选定测点的磨损量及对应测点的圆周速度，可得到各测点磨损量与圆周速度的关系。



说明：

1——稳压罐；2——加沙阀；3——调压阀；4——冷却循环系统；5——搅拌泵；
6——供水泵；7——转盘室；8——压力表；9——直流电机。

图1 圆盘式磨损试验装置系统示意图



说明：

1——阻流栅；2——试件。

图2 圆盘式磨损试验转盘室示意图

5.2.2 试验装置参数

试验装置参数应按下列条件选定：

- a) 圆盘直径：360~420mm。
- b) 圆盘与阻流栅的间隙：8~10mm。
- c) 圆盘旋转速度：2500~4000r/min。
- d) 圆盘室内压力：0.05~0.1MPa。

5.2.3 试件布置方式

试件布置方式如下：

- a) 宜采用3~8块相同扇形试件拼成完整圆盘并固定于底盘上。
- b) 每块扇形试件对应的圆弧角度宜分别为45°~120°。当试件数量为偶数时，可将对称的2块试

件布置同一种试验材料，测量磨损量时宜取两者的平均值。

5.2.4 磨损深度测量

磨损深度测量方法如下：

- a) 试验前，应先将试件编号，然后用酒精或类似物质清洗去除试件表面油污和杂物。
- b) 磨损量宜采用轮廓仪测量，也可采用数字式千分表测量。
- c) 当采用数字式千分表测量时，宜采用下列方法测量：
 - 1) 试件按 6 块扇形试件布置时，对应的圆弧角度为 60° 。
 - 2) 设定测量半径与测点。以试件边缝为起点，在试件外缘弧线上沿水流流动方向旋转 45° 的半径线为第一块试件测量半径，再依次旋转 60° ，其半径线为其他试件的测量半径。在测量半径上，半径范围 25~70mm 为不磨损基准段，从半径 30~65mm 设 8 个测点，测点间距为 5mm。半径范围 70~180mm 为磨损段，共设 14 个测点，测点半径值分别为 75mm、85mm、95mm、105mm、115mm、125mm、135mm、145mm、150mm、155mm、160mm、165mm、170mm、175mm。测量半径及测点布置示意图如图 3 所示。

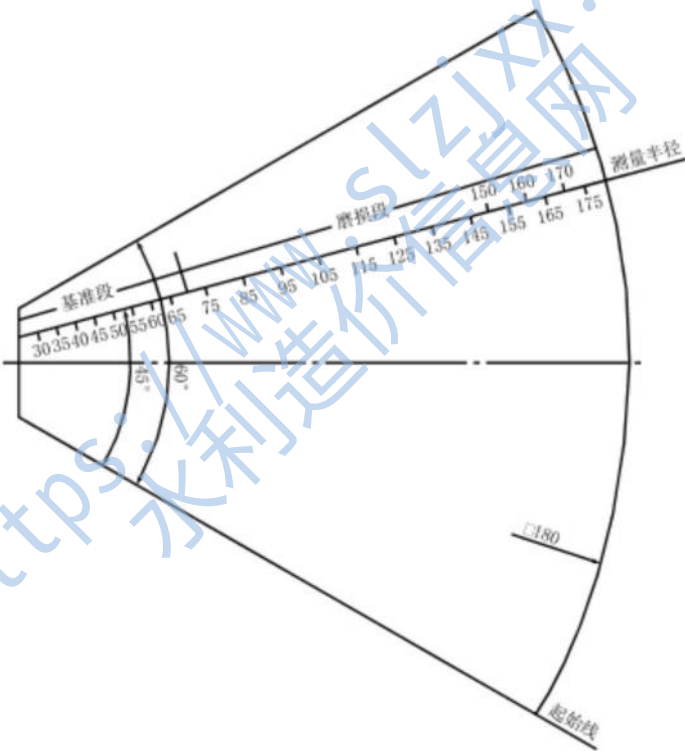


图 3 测量半径及测点布置示意图

- d) 每组试验宜测量 3 次，试验前测 1 次，即测量零点，在试验中及试验后各测 1 次。后两次测量值与前次测量值之差即为前后两个时段的磨损量。必要时可对两个时段磨损量对比分析。图 4 是实测结果的一个示例，图中 H_1 、 H_2 、 H_3 分别是试验前、中、后的测量值。
- e) 宜对试验前后圆盘试件拍照记录。

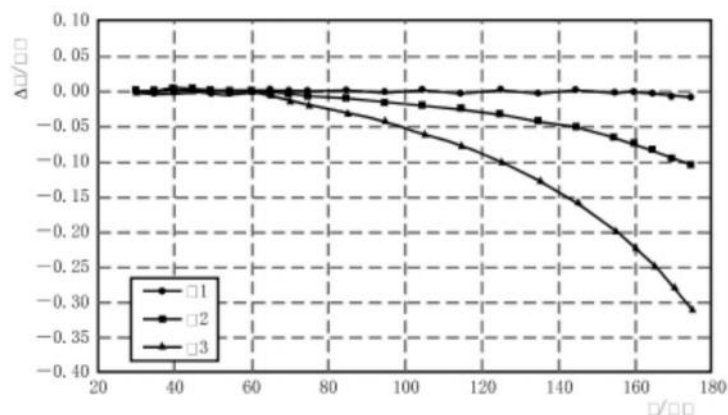
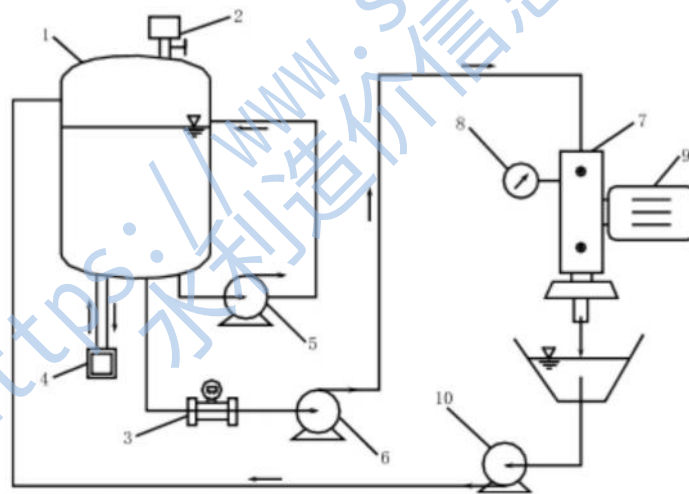


图4 测量值曲线

5.3 旋转喷射磨损试验

5.3.1 工作原理

旋转喷射磨损试验装置系统示意图如图5所示，试验段主体为转盘室，内设有圆盘、喷嘴。喷嘴的布置方式可与圆盘垂直或成一定角度。喷嘴为垂直布置的试验段见图6，旋转圆盘由18块梯形试件沿分布圆拼接而组成圆环面，含沙水流从对称的4个喷嘴射向试件，造成试件表面磨损破坏。



说明：

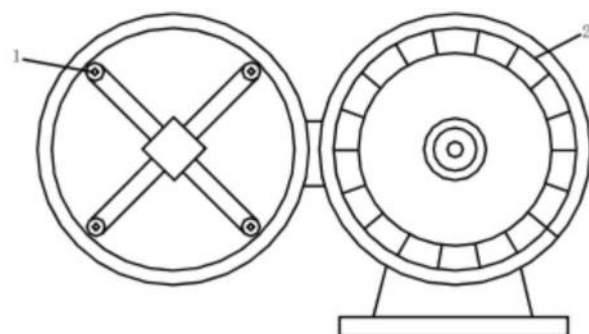
- 1——稳压罐；2——加沙阀；3——电磁流量计；4——冷却循环系统；5——搅拌泵；
6——多级泵；7——转盘室；8——压力表；9——直流电机；10——回水泵。

图5 旋转喷射磨损试验装置系统示意图

5.3.2 试验装置参数

试验装置参数宜按下列条件选定：

- 喷嘴对圆盘上试件的作用点分布圆直径：300~360mm。
- 圆盘转速：2500~4000r/min。



说明：

1——喷嘴；2——试件。

图6 旋转喷射试验转盘室示意图

c) 喷嘴数量：2~4个，喷嘴直径：3mm。

5.3.3 试件布置方式

试件布置方式宜采用镶嵌方式，采用若干块梯形试件镶嵌在圆盘上组成圆环面，含沙水流从对称的4个喷嘴沿圆环面中心线射向试件。

5.3.4 失重法测量

失重法测量方法如下：

- 试验前，应先将试件编号，然后用酒精或类似物质清洗去除试件表面油污和杂物，用烘箱100℃烘干0.5h，用分析天平称重，精度0.1mg。
- 宜将试件按设定位置装于圆盘上试验，试验结束后拆下试件，并用酒精或类似物质清洗试件表面，用烘箱100℃烘干0.5h，用分析天平称重，精度0.1mg。
- 宜对试验前后梯形试件拍照记录。

5.3.5 磨损轮廓面积-深度法测量

磨损轮廓面积-深度法测量方法如下：

- 试验前，应先将试件编号，然后用酒精或类似物质清洗去除试件表面油污和杂物。
- 宜将梯形试件放置在具有三维坐标的测量基座上用数字千分表测量。沿梯形试件半径方向的中线位置设定为测量线，两端为基准，中间部分为磨损段，共设13个测点，测点布置示意图如图7所示，测值为各测点处的磨损深度。将各测点实测值按折线连线并计算由连线构成的轮廓面积，再除以喷嘴直径，即为该试件磨损深度。在试验前与试验后各测1次，两次测量值之差即为该组次试件磨损深度。测量数据曲线如图8所示，图中5条曲线为5块同种材料实测的磨损深度，标注3-16、3-17、3-18、3-19、3-20为试件标识码，其中3代表第3组试验，16~20代表5块试件编号。
- 宜对试验前后梯形试件拍照记录。

5.4 参数测量

5.4.1 试验时间应根据试件磨损测量要求、材料抗磨性能、试验方法与试验条件等确定。

5.4.2 试验时段应根据试验水流速度、泥沙粒径、泥沙硬度等磨损试验条件确定。试验时段宜为6~8h。相同试验方法试验时段应保持一致。

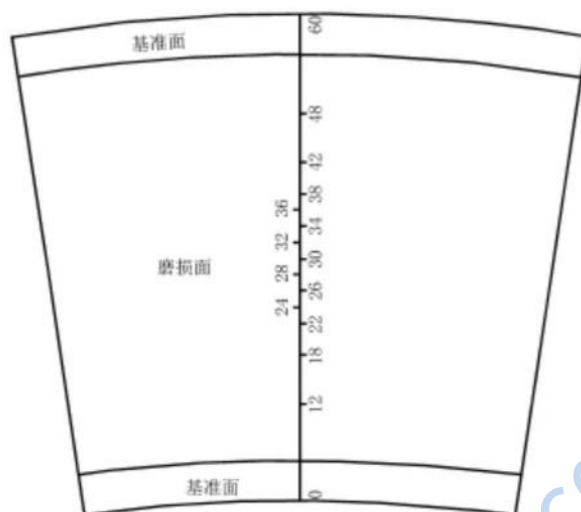


图7 测点布置示意图

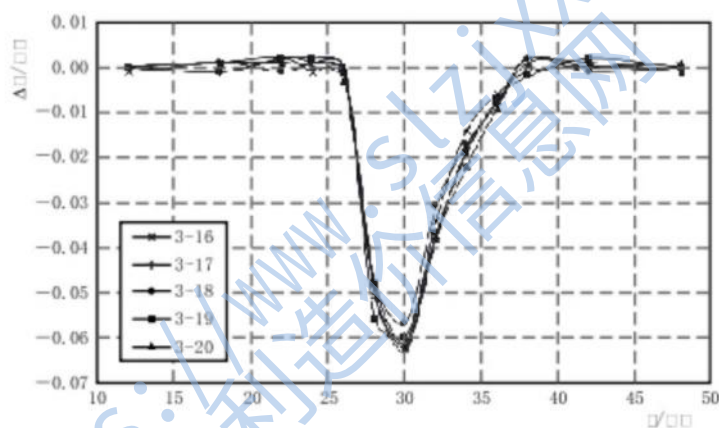


图8 测量数据曲线

5.4.3 试验水流速度确定原则如下:

- a) 圆盘式磨损试验水流速度主要由圆盘旋转速度确定。水轮机磨损定量分析时可将各测点圆周速度按经验公式 (1) 换算成各测点水流速度:

$$W = (0.82 \sim 0.94)U \quad (1)$$

式中:

W ——水流速度, m/s;

U ——各测点圆周速度, m/s。

- b) 旋转喷射试验水流速度宜根据圆盘旋转速度、喷嘴射流速度及喷射角确定。即作用在试件上的水流速度 W 为作用点处的圆周速度 U 与喷嘴射流速度 V_0 的矢量和。若改变圆盘转速、喷嘴射流速度或方向, 可改变 W 大小及冲角。

- c) 试验水流速度应不小于 30m/s。

5.4.4 含沙量测量方法如下:

- a) 在试验过程中应定时取水样, 可采用过滤法、烘干法或置换法进行测量。测量步骤应按照 GB/T 50159 的规定执行。

- b) 过滤法计算含沙量时,应采用标准量筒取水样并测量其体积和质量,分别按公式(2)~公式(4)计算水样的浑水密度、体积浓度和含沙量:

$$\rho_i = M/V \quad \text{..... (2)}$$

$$C_i = \frac{\rho_i - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad \text{..... (3)}$$

$$C = C_i \rho_s \quad \text{..... (4)}$$

式中:

ρ_i ——浑水密度, kg/m^3 ;

M ——水样质量, kg ;

V ——水样体积, m^3 ;

C_i ——体积浓度, %;

ρ_w ——清水密度, kg/m^3 ;

ρ_s ——泥沙密度, kg/m^3 , 试验前用标准容器和高精度称重仪器干沙兑清水测量确定;

C ——含沙量, kg/m^3 。

- c) 在一个试验时段内取水样次数应不少于3次。试验时应观察含沙水量的变化,当变化过大时应查明原因及时处理。

- d) 对同一种试验方法,定时取水样的时间间隔应一致。有条件的情况下,可采用在线检测。

5.4.5 泥沙特性分析方法如下:

- a) 泥沙特性分析应包括泥沙粒径、泥沙矿物成分与含量以及泥沙形貌分析等;

- b) 泥沙粒径分析应给出泥沙粒径级配、中值粒径与平均粒径等数值。泥沙矿物成分及含量分析应按不同泥沙粒径分别给出矿物成分及含量。泥沙形貌分析应给出泥沙颗粒形貌特征。平均粒径由公式(5)与公式(6)计算:

$$d_i = \frac{d_{\max} + d_{\min}}{2} \quad \text{..... (5)}$$

$$\bar{d}_{pj} = \sum_{i=1}^n (\Delta p_i d_i) / \sum_{i=1}^n \Delta p_i \quad \text{..... (6)}$$

式中:

d_i ——某一粒径组的平均粒径, mm ;

$d_{\max}$ ——某一粒径组泥沙上限粒径值, mm ;

$d_{\min}$ ——某一粒径组泥沙下限粒径值, mm ;

d_{pj} ——平均粒径, mm ;

Δp_i ——某一粒径组泥沙在全部沙样中所占重量百分比。

- 5.4.6 其他测量参数应包括试验转速、流量、压力、温度及水位计等。试验转速与流量应分别采用电子计数仪与电磁流量计测量,压力、温度及水位计等应采用常用仪表测量。

6 磨损预估与评价

6.1 磨损预估

6.1.1 磨损计算

- 6.1.1.1 磨损试验结果可用磨损深度、磨损率或单位磨损率表示。

- 6.1.1.2 磨损深度可按公式(7)计算:

$$\Delta H = KC^a W^b T \quad \text{..... (7)}$$

式中:

ΔH ——磨损深度, mm;

K ——综合影响系数, 与泥沙特性、材质性能及其他等多种因素有关;

C ——含沙量, kg/m^3 ;

a ——含沙量指数, 根据经验, a 值范围为 0.85~1.1, 简化时可取为 1.0;

W ——水流速度, m/s ;

b ——水流速度指数, b 值通常由试验确定, 不同试验条件下 b 值范围为 2.5~4.0, 无试验数据时可取为 3.0;

T ——磨损时间, h 。

6.1.1.3 磨损率可按公式 (8) 计算:

$$E = KC^a W^b \quad (8)$$

式中:

E ——磨损率, mm/h 。

6.1.1.4 单位磨损率可按公式 (9) 计算:

$$E_s = KW^b \quad (9)$$

式中:

E_s ——单位磨损率, mm/h 。

6.1.2 试验结果

6.1.2.1 圆盘式磨损试验可根据试验需求, 得到下列试验结果:

a) 采用 1 组试验时, 可得到不同材料磨损率与圆周速度的关系, 如图 9 所示。

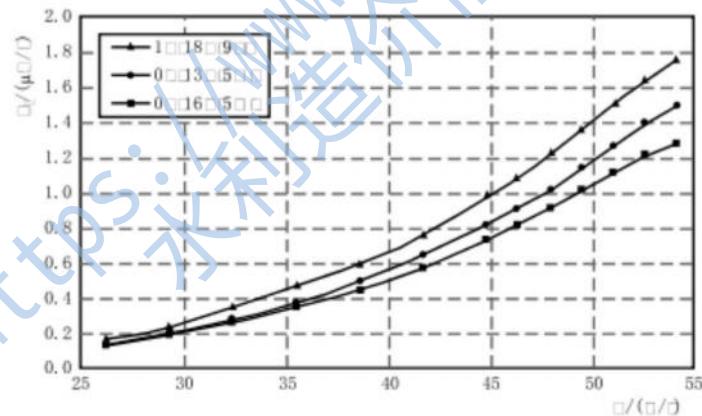


图 9 不同材料磨损率与圆周速度的关系

b) 采用不同泥沙级配试验时, 可得到粒径相对磨损系数 (K_d) 与泥沙中值粒径 (d_{50}) 的关系, 如图 10 所示。

c) 采用不同含沙量试验时, 可得到磨损量与含沙量的关系。

6.1.2.2 旋转喷射磨损试验可根据试验需求, 得到下列试验结果:

a) 采用 1 组或多组同类试验, 可得到不同材料磨损量对比关系及抗磨性相对强弱关系。

b) 当需求的试验速度较高时, 可采用多组不同速度点试验, 得到磨损量与速度的关系, 并可与圆盘式磨损试验成果进行衔接处理与分析, 用于冲击式水轮机、抽水蓄能机组等的磨损问题研究。

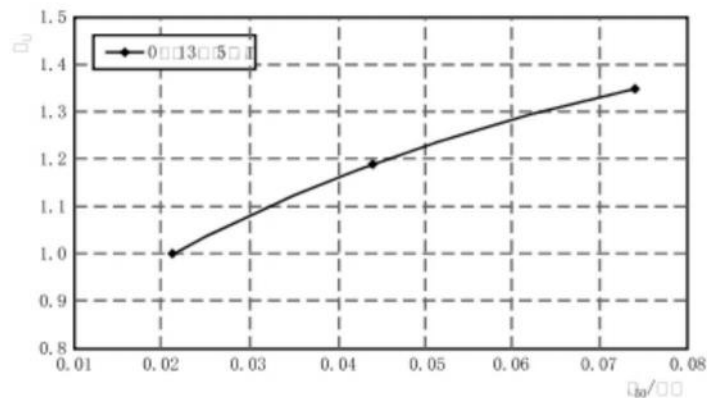


图 10 材料 0Cr13Ni5Mo 的粒径相对磨损系数与泥沙中值粒径的关系

6.1.3 磨损预估

6.1.3.1 磨损预估的内容是根据试验结果估算电站过机泥沙的磨损能力，用粒径相对磨损系数表示，并针对不同机型主要磨损部位估算电站不同运行年限内的年磨损量，以此根据经验判别水轮机主要磨损部位可能遭受的磨损程度，或与水轮机磨损的保证值做比较。反击式水轮机磨损保证值宜按照 GB/T 29403 的规定执行。

6.1.3.2 过机泥沙磨损能力估算宜采用中值粒径加权平均法。过机泥沙的粒径相对磨损系数可按公式 (10)、公式 (11) 计算。实际工程中电站过机泥沙磨损能力估算可参照附录 B。

$$K_{di} = \frac{\sum_{j=1}^n (C_{ij} K_{sj})}{\sum_{j=1}^n C_{ij}} \quad \text{..... (10)}$$

$$\sum_{j=1}^n C_{ij} = C_i \quad \text{..... (11)}$$

式中：

K_{di} ——电站不同运行年限过机泥沙的粒径相对磨损系数；

i ——电站不同运行年限序号；

j ——过机泥沙的分级粒径组序号；

C_{ij} ——分级粒径组的泥沙含量， kg/m^3 ；

K_{sj} ——分级粒径组的泥沙相对磨损系数， K_{sj} 可根据分级粒径组的粒径 d_j 从图 8 中直接查得，或者依据图 8 中的关系曲线对应的计算公式计算获得；

C_i ——电站不同运行年限过机泥沙含量， kg/m^3 。

6.1.3.3 主要磨损部位及特征流速确定方法如下：

a) 不同机型主要磨损部位可按表 1 确定。

表 1 水轮机不同机型的主要磨损部位

机 型	主要磨损部位	备 注
冲击式水轮机	喷嘴、喷嘴与水斗	喷嘴与喷嘴磨损重于水斗
混流式水轮机	导水机构、止漏环与转轮	高水头混流式水轮机导水机构磨损重于转轮
轴流式水轮机	转轮叶片外缘、转轮室中环	

- b) 主要磨损部位的特征流速可根据制造商的初步计算成果、相近水头段或比转速的其他电站相关资料确定，也可按表 2 进行简化计算。

表 2 主要磨损部位特征流速的简化计算

机 型	部 位	特征流速 W	符 号
冲击式水轮机	喷嘴、喷嘴	$0.98 \times \sqrt{2gH}$	H ——设计水头，m； Q ——设计流量， m^3/s ； a ——导叶最大开口，m； Z ——导叶数； B_0 ——导叶高度，m； u_2 ——转轮出口圆周速度，m/s； c_2 ——转轮出口法向速度，m/s； n ——额定转速，r/min； D ——转轮出口直径，m
	水斗	$0.49 \times \sqrt{2gH}$	
混流式与轴流式水轮机	导水机构（导叶）	$Q / (aZB_0)$	B_0 ——导叶高度，m； u_2 ——转轮出口圆周速度，m/s； c_2 ——转轮出口法向速度，m/s； n ——额定转速，r/min； D ——转轮出口直径，m
	转轮叶片出水边	$\sqrt{u_2^2 + c_2^2}$ 其中： $u_2 = n\pi D$ ， $c_2 = \frac{4Q}{\pi D^2}$	

6.1.3.4 主要磨损部位的磨损量估算应根据水库各个运行年限的过机含沙量及颗粒级配、主要磨损部位特征流速确定，可采用公式（1）或公式（7）和公式（8）估算。磨损量估算可参照附录 B。

6.2 磨损评价

6.2.1 不同材料对比试验中，基准材料宜采用常用材料，可选用 0Cr13Ni5Mo 不锈钢。不同材料的抗磨倍数按公式（12）计算。

$$\epsilon_i = H_1 / H_i \quad (12)$$

式中：

ϵ_i ——某材料抗磨倍数；

i ——材料序号，如试验材料为 6 种，则 $i=2, 3, \dots, 6$ ；

H_1 ——基准材料磨损量；

H_i ——某材料磨损量。

6.2.2 当试验方法不同或试验条件与原型水力机械有差异时，材料抗磨倍数可比性不宜简单比较，应根据具体问题分析确定。

6.2.3 工程应用磨损预估时，可根据磨损量估算结果及其他影响磨损因素，分析确定该工程水轮机的磨损程度。宜按照 GB/T 29403 的规定对磨损程度做出较明确的定性判断，例如可将磨损程度定性为轻微、中等和严重，并据此采取恰当而经济合理的抗磨措施。

附录 A

(资料性)

河流泥沙常见矿物种类及硬度

河流泥沙常见矿物种类及硬度见表 A.1。

表 A.1 河流泥沙常见矿物种类及硬度

序号	矿物种类	矿物化合物	主要化合物分子式	莫氏硬度
1	石英	氧化物	SiO_2	7.0
2	绿帘石	硅酸盐	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})(\text{SiO}_4)_2$	6.0~7.0
3	正长石	硅酸盐	KAlSi_3O_8	6.0~6.5
4	黄铁矿	硫化物	FeS_2	6.0~6.5
5	钠长石	硅酸盐	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	6.0~6.5
6	钾长石	硅酸盐	KAlSi_3O_8	6.0~6.5
7	金红石	氧化物	TiO_2	6.0~6.5
8	赤铁矿	氧化物	Fe_2O_3	5.5~6.5
9	透闪/辉石	硅酸盐	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$; $\text{Ca}_2\text{Mg}_5(\text{Si}_4\text{O}_{13})_2(\text{OH})_2$	5.5~6.0
10	钠闪石	硅酸盐	$\text{Na}_4\text{Fe}_3\text{Fe}_2(\text{Si}_4\text{O}_{13})_2(\text{OH})_2$	5.5~6.0
11	钛铁矿	氧化物	FeTiO_3	5.0~6.0
12	榍石	硅酸盐	CaTiSiO_5	5.0~6.0
13	角闪石	硅酸盐	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Na}_2, \text{K}_2)\text{SiO}_3$	5.5~6.0
14	磁铁矿	氧化物	Fe_3O_4	5.5~6.0
15	磷灰石	磷酸盐	$3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2, \text{CaF}_2$	5.0
16	萤石	卤化物	CaF_2	4.0
17	白云石	碳酸盐	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	3.5~4.0
18	白/黑云母	硅酸盐	$\text{H}_2\text{KAl}_2(\text{SiO}_4)_3(\text{H}, \text{K})_2$; $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	2.0~3.0
19	方解石	碳酸盐	CaCO_3	3.0
20	绿泥石	硅酸盐	$\text{H}_4\text{Mg}_3\text{SiO}_5 + \text{H}_4\text{Mg}_4\text{Al}_2\text{SiO}_5$	2.0~3.0
21	高岭石	硅酸盐	$\text{H}_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	1.0~2.5

附录 B
(资料性)
工程应用实例

B.1 工程概况

工程为某河流上兴建的大型水电工程。电站装机 $18 \times 700 \text{ MW}$ 混流式水轮发电机组，额定水头 186 m ，电站水库总库容 126.7 亿 m^3 。根据建设方提供的电站泥沙资料，建库后前 50 年的汛期（6—9 月）过机含沙量为 $0.46 \sim 0.79 \text{ kg/m}^3$ 。由于该电站机组具有容量大、参数高、流速高等特点，出于对电站投产后机组运行安全的考虑，应进行机组磨损问题调研和磨损预估研究，以便采取恰当而经济合理的抗磨措施。

B.2 机组主要参数

机组主要参数见表 B.1。

表 B.1 机 组 主 要 参 数

名称	额定水头 /m	额定出力 /MW	额定流量 /(m^3/s)	额定转速 /(r/min)	转轮直径 /m	年利用小时数 /h
参数	186	700	423.8	125	7.65	4530~5080

B.3 电站泥沙资料

电站坝址处原有河道多年平均含沙量 1.72 kg/m^3 ，多年汛期平均含沙量 2.43 kg/m^3 ，电站建库后水库每运行 10 年的汛期（6—9 月）平均过机含沙量及颗粒级配见表 B.2，莫氏硬度大于 5 的过机泥沙含量约为 51%。

表 B.2 电站建库后每运行 10 年汛期（6—9 月）平均过机含沙量及颗粒级配

年份 /年	含沙量 /(kg/m^3)	分级粒径组泥沙含量/(kg/m^3)				中值粒径 /mm
		$\leq 0.01 \text{ mm}$	$0.01 \sim 0.025 \text{ mm}$	$0.025 \sim 0.05 \text{ mm}$	$\geq 0.05 \text{ mm}$	
0~10	0.460	0.286	0.167	0.007	0.000	0.0079
11~20	0.513	0.294	0.204	0.015	0.000	0.0086
21~30	0.569	0.300	0.239	0.03	0.000	0.0095
31~40	0.671	0.313	0.291	0.067	0.000	0.0108
41~50	0.789	0.321	0.335	0.125	0.007	0.0123

B.4 试验方法与试验结果分析

B.4.1 试验方法：圆盘式磨损试验。

B.4.2 试验材料：0Cr13Ni5Mo、0Cr16Ni5Mo 及改性超高分子量聚乙烯材料。

B.4.3 试验用沙：取自电站坝址下游附近，经筛分成 3 种级配泥沙，泥沙粒径范围分别为： $d < 0.03 \text{ mm}$ 、 $0.03 \text{ mm} \leq d < 0.05 \text{ mm}$ 、 $0.05 \text{ mm} \leq d < 0.1 \text{ mm}$ 。

B.4.4 试验结果分析：

a) 试验用沙与 0Cr13Ni5Mo 材料的磨损与粒径关系式：

$$K_{sj} = 0.274 \ln(d_{50}) + 2.06 \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

 K_{sj} ——泥沙相对磨损系数。

b) 试验用沙与 0Cr13Ni5Mo 材料的磨损关系式：

$$\Delta H = K K_{sj} C W^{3.6} T \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

 ΔH ——材料的磨损深度，mm； K ——综合影响系数， $K = 1.16 \times 10^{-9}$ ； C ——含沙量， kg/m^3 ； W ——水流速度， m/s ； T ——运行时数，h。**B.5 建库后泥沙磨损能力估算**

根据试验得到的磨损与粒径关系式 (B.1) 和表 B.2，采用加权平均法对建库后汛期平均过机泥沙的磨损能力进行估算。各运行年限汛期过机泥沙相对磨损系数估算结果见表 B.3。

表 B.3 各运行年限汛期过机泥沙相对磨损系数估算结果

分组粒径范围/mm		≤ 0.01	$0.01 \sim 0.025$	$0.025 \sim 0.05$	≥ 0.05	含沙量 C_i /(kg/m^3)	泥沙相对 磨损系数 K_{si}
组内中间粒径 d_i /mm		0.005	0.0175	0.0375	0.075		
分组粒径相对磨损系数 K_{sj}		0.608	0.952	1.160	1.350		
0~10 年	分级粒径组 泥沙含量 C_{sj}	0.286	0.167	0.007	0.000	0.460	0.741
11~20 年		0.294	0.204	0.015	0.000	0.513	0.761
21~30 年		0.300	0.239	0.030	0.000	0.569	0.782
31~40 年		0.313	0.291	0.067	0.000	0.671	0.812
41~50 年		0.321	0.335	0.125	0.007	0.789	0.847

B.6 主要磨损部位的磨损量估算**B.6.1 主要磨损部位：**导叶、转轮叶片出口。**B.6.2 主要磨损部位的特征流速：**

a) 导叶：34m/s。

b) 转轮叶片出口：41.4m/s。

B.6.3 利用 B.4.4 中试验得到的磨损关系式 (B.2)、表 B.2、表 B.3 及特征流速值进行计算，各运行年限导叶与转轮叶片出口的磨损量估算结果见表 B.4。

B.6.4 根据表 B.4 磨损量估算结果及考虑其他影响磨损的因素，可判断该机组的磨损程度为中等偏严重，应在水轮机设计、制造、安装、运行、维护与检修等各个环节采取综合防护措施。

表 B.4 各运行年限导叶与转轮叶片出口的磨损量估算结果

运行时段 /年	含沙量 /(kg/m ³)	$K \cdot K_{di}$ /10 ⁻⁹	T /h	ΔH /(mm/s)	
				导叶 ($W=34\text{m/s}$)	转轮 ($W=41.4\text{m/s}$)
0~10	0.460	0.859	2403	0.310	0.629
11~20	0.513	0.883		0.355	0.721
21~30	0.569	0.907		0.404	0.822
31~40	0.671	0.942		0.495	1.006
41~50	0.789	0.982		0.607	1.233

注： T 为机组汛期运行时间。