

ICS xx. xx. xx  
x xx



中 华 人 民 共 和 国 水 利 行 业 标 准

SL xxx-201X

# 水力机械材料磨损试验方法

The method of material abrasion test for hydraulic machinery

(征求意见稿)

[请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回](#)

201X - XX - XX 发布

201X - XX - XX 实施

中华人民共和国水利部 发布



# 目 次

前 言 .....	III
引言 .....	IV
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的选择原则 .....	2
5 试验方法及测量 .....	3
5.1 一般规定 .....	3
5.2 圆盘式磨损试验 .....	3
5.2.1 工作原理 .....	3
5.2.2 试验装置参数 .....	4
5.2.3 试件布置方式 .....	4
5.2.4 磨损量测量方法 .....	4
5.3 旋转喷射磨损试验 .....	6
5.3.1 工作原理 .....	6
5.3.2 试验装置主要参数 .....	7
5.3.3 试件布置方式 .....	7
5.3.4 磨损量测量方法 .....	7
5.3.5 水流相对速度计算 .....	8
5.4 参数测量 .....	8
5.4.1 试验时间 .....	8
5.4.2 试验流速 .....	9
5.4.3 含沙量 .....	9
5.4.4 泥沙特性分析 .....	9
5.4.5 其它参数测量 .....	10
6 磨损预估与评价 .....	10
6.1 磨损预估 .....	10
6.2.1 磨损计算 .....	10
6.2.2 试验结果 .....	10

6.2.3 磨损预估 .....	12
6.2 相对抗磨性评价 .....	13
附录 A（资料性附录）工程应用实例 .....	15
A.1 工程概况 .....	15
A.2 机组主要参数 .....	15
A.3 电站泥沙资料 .....	15
A.4 试验方法与试验结果 .....	15
A.5 建库后泥沙磨损能力估算 .....	16
A.6 主要磨损部位的磨损量估算 .....	16
<a href="#">图 1 圆盘式磨损试验装置示意图</a> .....	4
<a href="#">图 2 扇形试件加工图</a> .....	5
<a href="#">图 3 测量值曲线</a> .....	6
<a href="#">图 4 旋转喷射磨损试验装置示意图</a> .....	7
<a href="#">图 5 测点布置示意图</a> .....	8
<a href="#">图 6 磨损量测量结果</a> .....	8
<a href="#">图 7 3 种材料磨损率与圆周速度的关系</a> .....	11
<a href="#">图 8 材料 0Cr13Ni5Mo 的磨损量与泥沙粒径的关系</a> .....	11

## 前 言

根据水利行业标准制修订计划安排，按照 GB/T 1.1-2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》，编制本标准。

本标准共 6 章 1 个附录，主要技术内容有：

——试验方法与试验条件的选择原则；

——试验方法及测量；

——磨损预估与评价。

本标准为全文推荐。

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部综合事业局

本标准解释单位：水利部综合事业局

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

审查会议技术负责人：xxx

本标准体例格式审查人：xxx

## 引言

我国水力机械的磨损问题十分突出。由于水力机械磨损机理十分复杂，有关机理研究虽取得了一定进展，但仍不充分。到目前为止针对水力机械材料磨损问题与磨损规律的研究仍主要通过试验手段来完成。从国内外研究动态看，水力机械材料磨损试验种类较多，但很不规范。50 多年来我国在基础研究及试验方法方面积累了丰富经验，提出了多种简便实用的试验方法，取得了较好的工程应用成果。为使材料磨损试验标准化、规范化，保证试验结果与评价及工程应用质量，有必要制订本标准。

# 水力机械材料磨损试验方法

## 1 范围

本标准规定了进行水力机械材料磨损试验的有关技术要求。

本标准适用于水力机械过流部件材料在含沙水流条件下抗泥沙磨损性能的测定与评价以及在工程应用中的磨损预估。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2900.45 电工术语 水电站水力机械设备

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文件。

### 3.1

**试验 test**

按照应用需求在给定试验条件及参数下能够得到材料抗磨损性能的一个或多个试验磨损过程。

### 3.2

**试验时段 test interval**

在考虑试验泥沙循环使用的效果及实验室条件下，试验泥沙一次性使用的时间。

### 3.3

**试验组次 sets of test**

为试验的最小单元，即一个完整的磨损试验过程。

### 3.4

**泥沙磨损 silt abrasion**

因水流携带泥沙引起的对流道表面所造成的材料破坏和流失。

### 3.5

**磨损量 amount of abrasion**

$\Delta H(\text{mm})$ 、 $A(\text{cm}^2)$ 、 $G(\text{g})$ 或 $V(\text{mm}^3)$

水流携带泥沙对流道表面所造成的材料流失量。磨损量可用磨损深度 $\Delta H$ 、磨损面积 $A$ 、质量损失 $G$ 、体积损失 $V$ 等表示。

### 3.6

**磨损率 abrasion rate**

在给定的磨损条件下，材料单位时间内的磨损量。

3.7

**单位磨损率 unit abrasion rate**

设定含沙量为  $1 \text{ kg/m}^3$  时的磨损率。

3.8

**粒径 grain size**

$d$

泥沙颗粒的大小。

注：粒径单位用（mm）表示。

3.9

**粒径级配曲线 grain size distribution curve**

表征泥沙颗粒大小分布特征的曲线。

注：粒径级配曲线是根据筛分试验成果绘制的曲线，采用对数坐标表示，横坐标为粒径，纵坐标为小于某粒径的泥沙占总重量（累计百分）的含量。

3.10

**中值粒径 median grain size**

$d_{50}$

在全部沙样中，小于和大于此粒径的泥沙重量各为 50%。

注：中值粒径单位用（mm）表示。

3.11

**平均粒径 mean grain size**

$d_{pj}$

将一组泥沙按粒径大小分成若干组，各粒径组平均粒径的重量百分比的加权平均值，为平均粒径，亦为算术平均粒径。

注：平均粒径单位用（mm）表示。

3.12

**抗磨倍数（亦称相对耐磨性） anti-abrasion coefficient (relative abrasion resistance)**

在相同磨损条件下，试验材料耐磨性与标准材料耐磨性的比值。

3.13

**抗磨损性能 anti-abrasion performance**

表征水力机械过流表面材料抵抗泥沙磨损的性能参数。包括磨损量、磨损率以及抗磨倍数等。

4 试验方法与试验条件的选择原则

4.1.1 试验方法宜选择工程应用成果较多、可比性强及可用于定量分析的试验方法。

4.1.2 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。其中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；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。

#### 4.1.3 所选择的试验方法与试验条件应满足以下要求：

- a) 试验装置的水力磨损条件应与磨损部件（部位）的水力磨损条件相似；
- b) 磨损的参数应相近，如水流速度、泥沙浓度、泥沙粒径及颗粒打击角度等；
- c) 试件材质与原型水力机械过流部件相同或相近；
- d) 水质与原型水力机械相同或相近；
- e) 试件材料表面的磨损破坏形貌与原型水力机械过流部件表面的相近或相似，即水力磨损的过程与磨损机理相似。

4.1.4 实验室试验条件不能满足 4.1.3 中全部 5 项条件时，可选择满足其中几项条件，如满足其中的 a)、b)、c) 项。

4.1.5 新材料开发研制初期试验阶段，试验方法与试验条件不作明确要求。

### 5 试验方法及测量

#### 5.1 一般规定

##### 5.1.1 对试验装置循环系统的要求如下：

- a) 设备与管路布置应有利于循环水的流动通畅，避免泥沙淤积。当循环系统为封闭式，应保持试验过程中试验段内部的压力不出现负压；
- b) 应设冷却设备，试验时的水温应不高于 35℃；
- c) 管路内的水流速度应大于 4 m/s。当循环系统的某部分（如稳压罐）的水流速度过低时，应加设搅拌泵进行搅拌；
- d) 在循环系统低处应设沉沙池，底部应设排空阀。

##### 5.1.2 试验主要参数应满足运行稳定及测量精度要求。

5.1.3 试验用沙宜采用河流悬移质泥沙。当悬移质泥沙的数量较难获得时，可在坝址处附近淤积泥沙中采集一定量泥沙，通过筛分得到所需试验用沙，或采用颗粒级配相近的石英沙代替。在每一次的磨损试验中，应保持试验泥沙的磨损能力稳定。

5.1.4 试验用试件的表面粗造度应与原型水力机械过流部件的相同或相近，如表面粗造度应不低于 1.6 μm 或 3.2 μm。试件装配后形成的平面应平整。

5.1.5 试验过程中，应根据具体的磨损试验条件，如磨损速度、泥沙粒径、泥沙硬度等条件定期更换试验用沙，宜 5~6 h 更换一次新沙。

#### 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为封闭式循环系统。磨损试验系统示意图见图 1.a)，试验装置主体为转盘室，内设有圆盘与阻流栅，见图 1.b)。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基本关系。

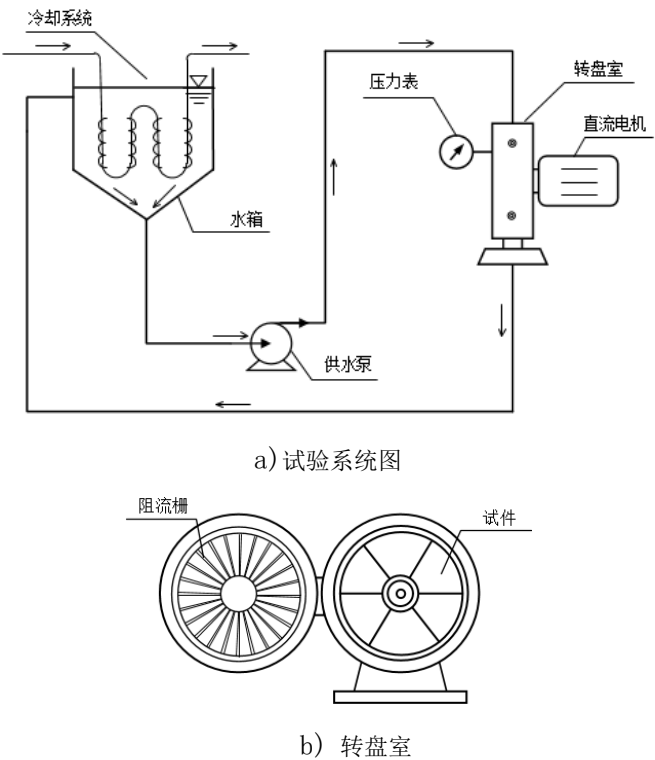


图 1 圆盘式磨损试验装置示意图

5.2.2 试验装置参数

按下列条件选定:

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

5.2.3 试件布置方式

试件布置为拼接方式,即采用 3~8 块大小相同的扇形试件拼成一完整圆盘并固定于底盘上,每块扇形试件对应的圆弧角度分别为 120°~45°。当试件数量为偶数时,可考虑将对称的 2 块试件布置同一种试验材料,测量磨损量时取两者的平均值。

5.2.4 磨损量测量方法

将扇形试件拼成圆盘后，放置在专用的具有三维坐标的分度盘上使用数字式千分表进行测量。  
有条件时可采用轮廓仪对磨损量进行更为精确的测量，测量时应注意基准点或基准面的选择。

以 6 块扇形试件（圆盘直径为 360mm）为例的测量方法如下：

- a) 试件按 6 块扇形试件布置时，对应的圆弧角度为 60°；
- b) 设定测量半径与测点。以试件的边缝为起点，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的测量半径，再依次旋转 60°，其半径线为其它试件的测量半径。  
在测量半径上，半径范围 25~70 mm 为基准段（不磨损），从半径 30mm 至 65mm 间设 8 个测点，测点间距为 5 mm。半径范围 70~180mm 为测量段（亦为磨损段），共设 14 个测点，测点半径值分别为 75、85、95、105、115、125、135、145、150、155、160、165、170、175（mm）。测量半径及测点布置示意图见图 2；

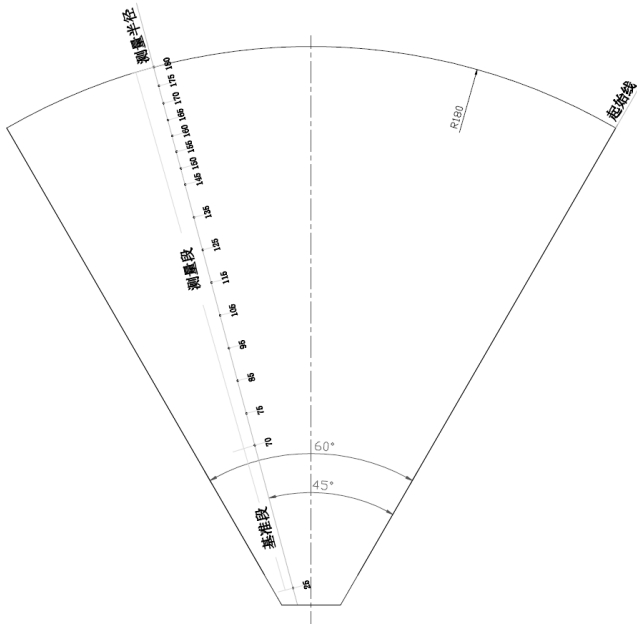


图 2 测量半径及测点布置示意图

- c) 每组试验通常测量三次，试验前（未磨损）测一次，即测量零点，在试验中及试验后各测一次。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的磨损量进行对比分析。图 3 是实测结果的一个示例（注：图中横坐标 R 为测量半径值，纵坐标 H 为磨损量，H<sub>1</sub>、H<sub>2</sub> 分别是试验前、后的测量值）；
- d) 对试验前后的圆盘（试件）进行拍照。

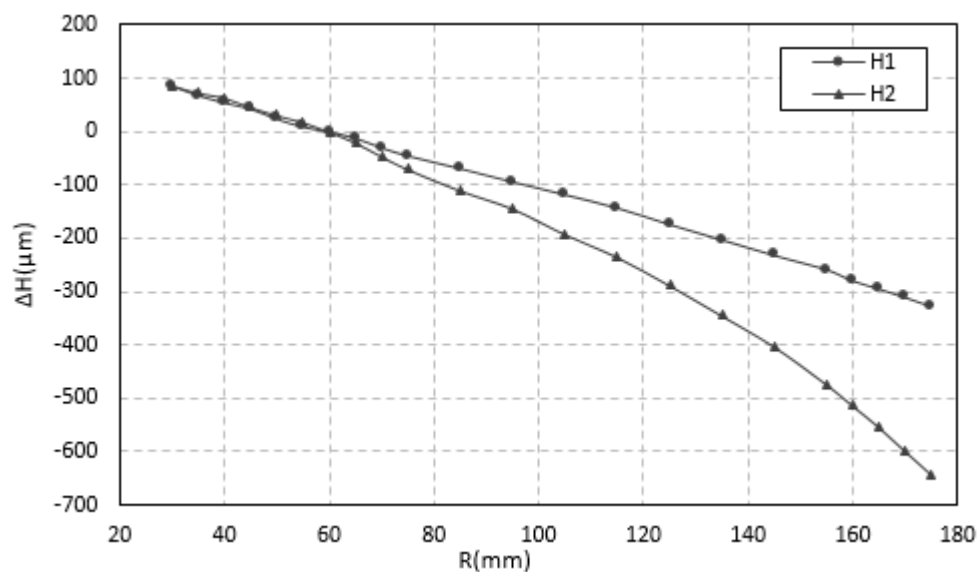
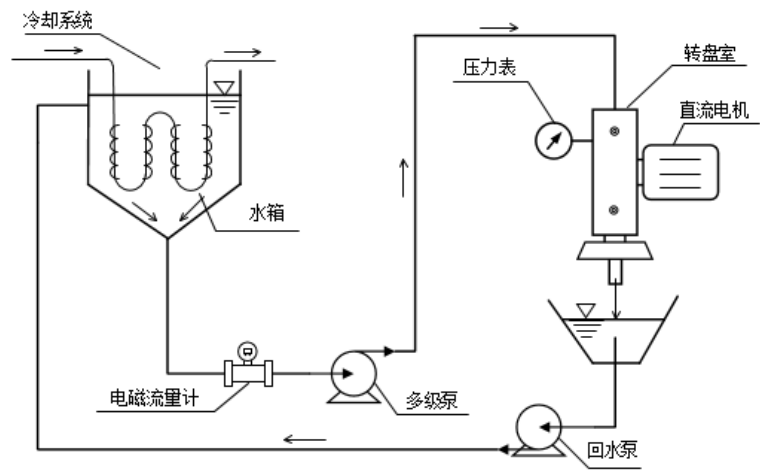


图3 测量值曲线

5.3 旋转喷射磨损试验

5.3.1 工作原理

旋转喷射磨损试验系统示意图见图 4.a)，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 4.b)，旋转圆盘由若干块（图中为 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。



a) 试验系统图

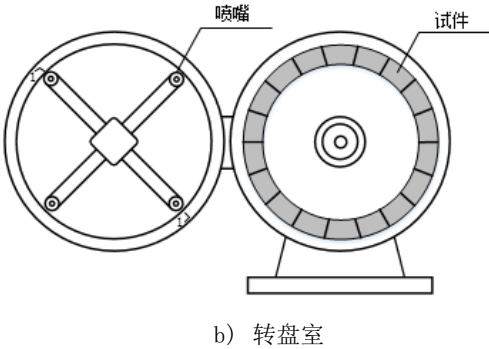


图4 旋转喷射磨损试验装置示意图

5.3.2 试验装置主要参数

按下列条件选定：

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

5.3.3 试件布置方式

试件布置为镶嵌方式，采用 18 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 磨损量测量方法

5.3.4.1 可采用失重法、深度或面积测量磨损量。失重法得到的试验成果仅可用于定性分析，而深度或面积测量方法得到的试验成果既可用于定性分析，也可用于定量分析。

5.3.4.2 失重法测量方法如下：

- a) 试验前，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。用分析天平称重，精度 0.1mg；
- b) 将试件按设定位置装于圆盘上进行试验，试验结束后折下试件，并用酒精或类似物质清洗试件表面。用分析天平称重，精度 0.1mg；
- c) 对试验前后的试件进行拍照。

5.3.4.3 深度或面积测量方法如下：

- a) 磨损量测量采用磨损轮廓面积-深度法。将梯形试件放置在专用的具有三维坐标的测量基座上用数字千分表进行测量。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，测点布置示意图见图 5。将测量断面各测点的实测值联络一起形成磨损轮廓包络线，求其面积（实际将测点间实测值按折线连线计算面积），再除以喷嘴直径，即为该断面磨损平均深度。在试验前与试验后各测一次，两次测量值之差即为该组次试件的磨损量。测量结果见图 6（注：图中横坐标 L 为测点相对值，纵坐标  $\Delta H$  为磨损量）；
- b) 对试验前后的试件进行拍照。

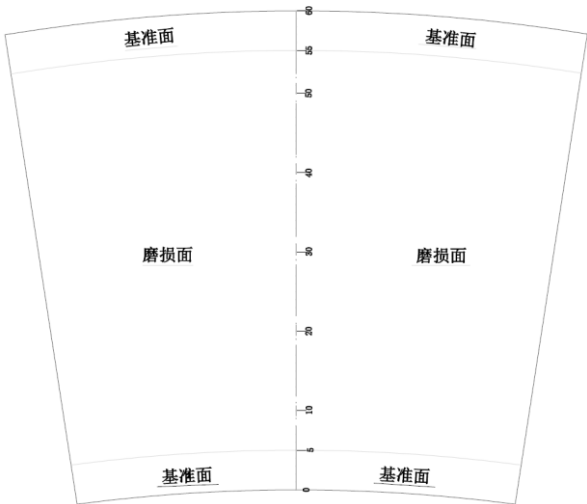


图 5 测点布置示意图

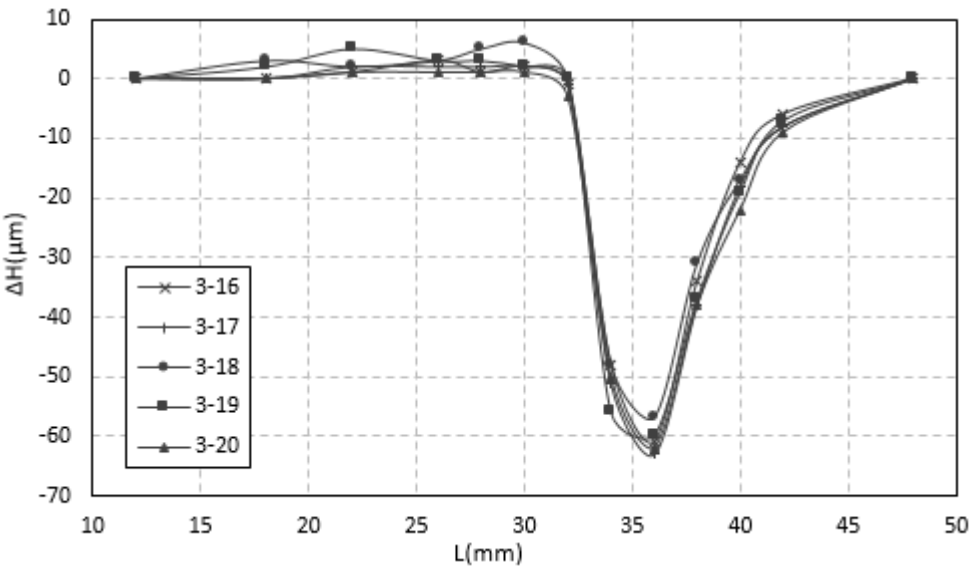


图 6 磨损量测量结果

5.3.5 水流相对速度计算

作用在试件上的水流相对速度  $W$  为作用点处的圆周速度  $U$  与喷嘴射流速度  $V$  之矢量和, 即  $W = U + V$ 。若改变圆盘转速、喷嘴射流速度的大小或方向, 可改变  $W$  的大小及冲角。

5.4 参数测量

5.4.1 试验时间

5.4.1.1 以试件被磨损后的破坏量便于测量来确定试验时间。试验时间的长短除了主要与被试材料的抗磨性能有关外, 也与所选择的试验方法与试验条件有关。试验时间宜为 24~48 h。时间计量的精度为 1 min。

5.4.1.2 试验过程中, 应根据具体的磨损试验条件, 如磨损速度、泥沙粒径、泥沙硬度等条件确定试验时段 (更换一次新沙所使用的时间), 试验时段宜为 6~8 h。对同一种试验方法, 试验时段应保持一致。

## 5.4.2 试验流速

5.4.2.1 不同试验方法中试验流速的定义各不相同。圆盘式磨损试验的试验流速为扇形试件上对应测点处的相对流速；旋转喷射试验的试验流速为梯形试件上对应测点处线速度与喷嘴射流速度的合成速度。试验流速应不小于 30 m/s。

5.4.2.2 圆盘式磨损试验中的试验流速主要取决于圆盘的旋转速度，各测点的圆周速度与对应点的相对流速存在一定的差异，在用于水轮机磨损的定量分析时，应将各测点的圆周速度通过经验系数换算成相对流速。旋转喷射磨损试验中的试验流速为单一值，其大小取决于圆盘的旋转速度与喷嘴射流的速度及冲角。

## 5.4.3 含沙量

5.4.3.1 试验含沙量应与原型水力机械过机含沙量相近。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，应进行含沙量与磨损的关系试验。

5.4.3.2 含沙量的测量。在试验过程中定时取水样，然后采用过滤法、烘干法或置换法进行测量，执行 GB/T 50159 的规定。

过滤法测量含沙量按公式（1）计算：

用标准量筒取水样并测量其体积  $V$  和质量  $M$ ，换算出浑水密度  $\rho_i = M/V$ ，单个水样的泥沙浓度  $C_i$  按公式（2）计算，对同一种试验方法，定时取水样的时间间隔应一致。有条件情况下，可采用在线检测。

$$S = C_i \cdot \rho_s \quad (1)$$

$$C_i = (\rho_i - \rho_w) / (\rho_s - \rho_w) \quad (2)$$

式中：

$S$  — 含沙量， $\text{kg/m}^3$ ；

$C_i$  — 单个水样的泥沙浓度；

$\rho_i$  — 浑水密度；

$\rho_w$  — 清水密度， $\text{kg/m}^3$ ；

$\rho_s$  — 泥沙密度， $\text{kg/m}^3$ ，在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。

5.4.3.3 在一个试验时段内的取水样次数应不少于 3 次。试验时应注意观察含沙量的变化不宜过大，否则应查明原因并进行处理。

## 5.4.4 泥沙特性分析

5.4.4.1 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。泥沙特性分析应选择有资质的单位承担。

5.4.4.2 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的形貌特征。平均粒径由公式（3）计算。

$$d_{pj} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i d_i / \sum_{i=1}^n \Delta p_i \quad (3)$$

式中:

$\Delta p_i$  — 某一粒径组泥沙在全部沙样中所占重量百分比;

$d_i$  — 某一粒径组的平均粒径。 $d_i = (d_{\max} + d_{\min}) / 2$ ,  $d_{\max}$ 、 $d_{\min}$  分别为某一粒径组泥沙上限与下限粒径值。

#### 5.4.5 其它参数测量

包括试验转速、流量、压力、温度及水位计等参数。试验转速与流量分别采用电子计数器与电磁流量计测量, 压力、温度及水位计等采用常用仪表测量。

### 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量、磨损率或单位磨损率表示。

6.1.1.2 磨损量按公式(4)计算:

$$\Delta H = K S^M W^N T \quad (4)$$

式中:

$\Delta H$  — 材料的磨损深度 (mm);

$K$  — 综合影响系数;

$S$  — 含沙量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$M$ 、 $N$  — 指数;

$W$  — 水流相对速度 ( $\text{m}/\text{s}$ );

$T$  — 磨损时间 (h)。

6.1.1.3 磨损率按公式(5)计算:

$$E = K S^M W^N \quad (5)$$

式中:

$E$  — 磨损率( $\text{mm}/\text{h}$ ),  $E = \Delta H / T$ 。

6.1.1.4 将公式(5)除以  $S^M$  得到单位磨损率, 见公式(6):

$$E_s = K W^N \quad (6)$$

式中:

$E_s$  — 单位磨损率( $\mu\text{m}/\text{h}$  |  $S = 1\text{kg}/\text{m}^3$ )。

#### 6.1.2 试验结果

6.1.2.1 根据试验需求, 圆盘式磨损试验可得到如下试验结果:

a) 若进行一组试验, 可得到不同材料磨损率与圆周速度的关系, 见图 7;



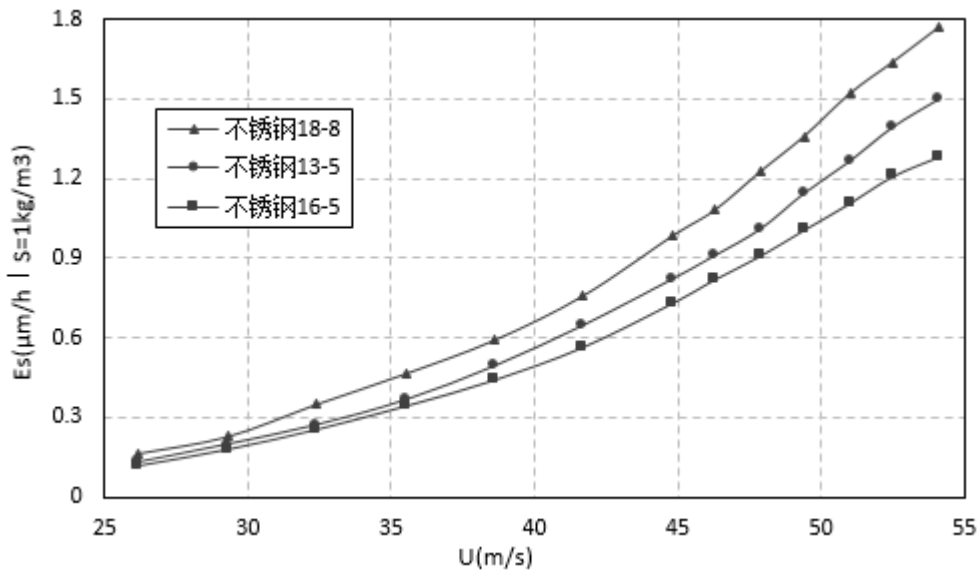


图 7 3 种材料磨损率与圆周速度的关系

b) 若进行多种不同泥沙级配试验，可得到磨损量与泥沙粒径的关系，见图 8；

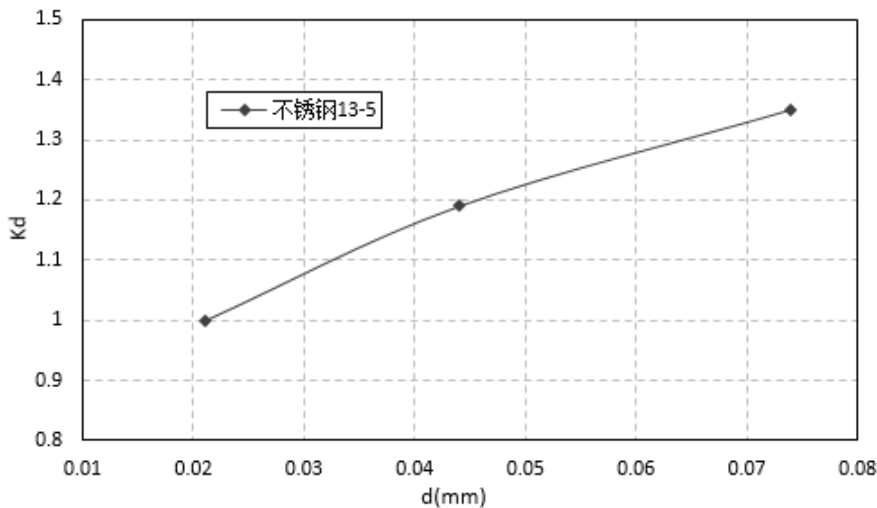


图 8 材料 0Cr13Ni5Mo 的磨损量与泥沙粒径的关系

c) 若进行多种不同含沙量试验，可得到磨损量与含沙量的关系；

d) 根据上述试验结果可用于材料对比与定量分析，包括材料的抗磨损性能测定与评价、磨损特性与规律试验以及工程应用中磨损预估分析。

6.1.2.2 圆盘式磨损试验方法的磨损属于小角度平顺绕流磨损，材料破坏机理与叶片流道等的磨损较为相近，可用于平面绕流磨损的预估。考虑到原型水力机械的磨损是由水流相对速度造成的，故在进行磨损预估时，应将圆盘试验结果中的圆周速度换算成水流相对速度，按公式（7）进行换算。

$$W = 0.88 U \tag{7}$$

式中：

W — 水流相对速度（m/s）；

U — 圆周速度（m/s）。

6.1.2.3 根据试验需求，旋转喷射磨损试验可得到如下试验结果：

- a) 若进行一组或多组同类试验，可得到不同材料的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，可进行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，用于高水头水轮机（如冲击式水轮机、抽水  
蓄能机组等）的磨损问题研究；
- c) 旋转喷射磨损试验方法的磨损属于冲击式磨损，更适合用于冲击式水轮机的磨损或反击式  
水轮机叶片头部的磨损预估。

6.1.2.4 实验室试验可作为鉴定材料性能的初步筛选之用。在大规模推广应用于原型水力机械前，应在原型水力机械上或磨损条件相近的中间机组上进行较长时间的试验检验。

6.1.3 磨损预估

6.1.3.1 在对水利水电工程中磨损问题进行论证时，首先应根据机组类型、主要参数、磨损特点、泥沙资料等技术资料，选择合适的试验方法进行试验。其次在选定试验用沙（推荐采用河流悬移质泥沙）后，通过试验得到试验用沙的磨损能力，据此估算水力机械过机泥沙的磨损能力。然后针对水力机械中不同机型的主要磨损部位进行磨损量预估，以确定水力机械主要磨损部位的年磨损量，并以此判别分析水力机械可能遭受的磨损程度，或与水力机械磨损的保证值做比较。水轮机磨损保证值的相关规定可参见 GB/T 29403。

6.1.3.2 河流泥沙磨损能力的估算规定如下：

- a) 宜采用以下两种方法进行估算：一是加权平均法，含沙量为  $C$ ，先分别算出各分级粒径组的相对磨损系数（ $K_{zj}$ ），再以各粒径组的含沙量（ $C_j$ ）为权重，算出  $\sum (C_j K_{zj}) / C$ （其中  $C = \sum C_j$ ），即为该泥沙总的相对磨损系数（ $K_i$ ）。二是按泥沙级配的加权平均粒径或中值粒径进行估算；
- b) 根据磨损试验得到的磨损与粒径大小的关系和前面已给出的泥沙资料，便可估算出工程建库后各运行年限年平均过机泥沙的磨损能力。详细的河流泥沙磨损能力估算见附录 A。

6.1.3.3 主要磨损部位及特征流速规定如下：

- a) 由于水力机械不同机型的结构特点与应用水头的不同，其磨损特点各不相同，主要磨损部位也各不相同。国内水力机械不同机型的主要磨损部位见表 1。

表 1 水力机械不同机型的主要磨损部位

机型	主要磨损部位	备注
水斗式水轮机	喷针、喷嘴与水斗	喷针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	
贯流式水轮机	转轮叶片外缘、转轮室中环	
高扬程离心泵	密封环、叶轮出口外缘边	

b) 主要磨损部位的特征流速可根据拟投标的制造商的初步计算成果或国内相近水头段其它电站的相关资料确定，亦可进行简化计算，见表 2。

表 2 主要磨损部位的特征流速的简化计算

机型	部位	特征流速 (W)	符号
水斗式水轮机	喷针喷嘴	$k\sqrt{2gH}$ , $k = 0.98$	k: 流速系数 H: 设计水头 (m) Q: 设计流量(m³/s)
	水斗	$0.49 \cdot \sqrt{2gH}$	
混流式与轴流式水轮机	导水机构 (导叶)	$Q/(a Z B_0)$	a: 导叶最大开口(m) Z: 导叶数 B <sub>0</sub> : 导叶高度(m)
贯流式水轮机	导水机构 (导叶)	$0.49 \cdot \sqrt{2gH}$	u <sub>2</sub> : 转轮出口圆周速度(m/s) c <sub>2</sub> : 转轮出口法向速度(m/s)
混流式、轴流式和贯流式水轮机	转轮叶片出水边	$(u_2^2 + c_2^2)^{0.5}$ 其中 $u_2 = n \cdot \pi \cdot D$ ; $c_2 = 4 Q / (\pi \cdot D^2)$	n: 额定转速(r/s) D: 转轮出口直径(m)
高扬程离心泵	叶轮出口边	$(u_2^2 + c_2^2)^{0.5}$ 其中 $u_2 = n \cdot \pi \cdot D$ ; $c_2 = 4 Q / (\pi \cdot D^2)$	u <sub>2</sub> : 叶轮出口圆周速度(m/s) c <sub>2</sub> : 叶轮出口法向速度(m/s) n: 额定转速(r/s) D: 叶轮出口直径(m) Q: 设计流量(m³/s)

6.1.3.4 主要磨损部位的磨损量估算。根据水轮机过机泥沙资料（包括水库各个运行年限的过机含沙量及颗粒级配）、主要磨损部位的特征流速，利用公式（5）、（8），对主要磨损部位的磨损量进行估算。详细的磨损量估算见附录 A。

6.2 抗磨性评价

6.2.1 在不同材料的对比试验中，宜采用常用材料，且材料性能及抗磨性能为大家所熟悉，如 0Cr13Ni5Mo 不锈钢为基准材料。不同材料的抗磨倍数按公式（8）计算。基准材料的抗磨倍数为 1，若其他材料的抗磨倍数大于 1，表明该材料抗磨性优于基准材料。反之，表明该材料抗磨性比基准材料差。

$$\epsilon_i = H_1 / H_i \tag{8}$$

式中：

- ε<sub>i</sub> — 抗磨倍数；
- H<sub>1</sub> — 基准材料磨损量；
- i — 材料编号，如试验材料为 6 种，则 i=2、3、...、6；
- H<sub>i</sub> — 其他材料磨损量。

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，材料抗磨倍数的可比性不宜简单的比较，应根据具体问题进行具体分析与评价。当使用条件与试验条件的差异很大时，其试验结果不宜直接用于实际应用。

6.2.3 在对材料抗磨性评价时，不宜将磨损与空蚀两种破坏形式在同一试验中进行。可分别进行材料的

磨损与空蚀试验，根据两项试验的结果进行综合评价。防护材料要求抗磨性与抗空蚀性两者兼顾。推荐使用不锈钢等耐腐蚀性能较好的材料。

6.2.4 在进行工程应用的磨损预估时，可根据磨损量估算结果及考虑其它影响磨损的因素，判断该工程水力机械的磨损程度，磨损程度分为轻度、中等和严重三类，并据此采取恰当而经济合理的抗磨措施。

附录 A  
(资料性附录)  
工程应用实例

A.1 工程概况

工程为某河流上新建的大型水电工程。电站装机 18×700 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<sup>3</sup>。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 0.46～0.79 kg/m<sup>3</sup>。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，需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。

A.2 机组主要参数

机组主要参数见表 A.1。

表 A.1 机组主要参数

名称	额定水头 (m)	额定出力 (万 kw)	额定流量 (m <sup>3</sup> /s)	额定转速 (r/min)	转轮直径 (m)	年利用小时数 (h)
参数	186	70	423.8	125	7.65	4530～5080

A.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<sup>3</sup>，多年汛期平均含沙量 2.43 kg/m<sup>3</sup>，电站建库后水库每运行 10 年的汛期平均过机含沙量及颗粒级配见表 A.2，莫氏硬度大于 5 的过机泥沙含量约为 51%。

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

年份 (年)	含沙量 (kg/m <sup>3</sup> )	分级粒径组泥沙含量 (kg/m <sup>3</sup> )				中值粒径 (mm)
		≤0.01 mm	0.01～0.025 mm	0.025～0.05 mm	≥0.05 mm	
10	0.460	0.286	0.167	0.007	0.000	0.0079
20	0.513	0.294	0.204	0.015	0.000	0.0086
30	0.569	0.300	0.239	0.03	0.000	0.0095
40	0.671	0.313	0.291	0.067	0.000	0.0108
50	0.789	0.321	0.335	0.125	0.007	0.0123

A.4 试验方法与试验结果

A.4.1 试验方法：圆盘式磨损试验。

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

A.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：0.05 mm < d < 0.1 mm、0.03 mm < d < 0.05 mm、d < 0.03 mm。

A.4.4 试验结果：

a) 0Cr13Ni5Mo 材料的磨损与粒径关系式，即  $K = 0.274 \ln(d) + 2.06$ ，式中 k 为相对磨损系数，

d 为加权平均粒径；

b) 0Cr13Ni5Mo 材料的磨损关系式, 即  $\Delta H = K C T W^{3.6}$ , 式中,  $\Delta H$  为材料的磨损深度 (mm),  $K=1.16 \times 10^{-9}$  (综合影响系数),  $C$  为含沙量,  $T$  为运行时数,  $W$  为水流速度。

A.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和表 A.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。估算结果见表 A.3。

表 A.3 各运行年限汛期过机泥沙的相对磨损系数  $K_i$  估算

粒径组范围 (mm)		≤0.01	0.01~0.025	0.025~0.05	≥0.05	含沙量 C (kg/m <sup>3</sup> )	相对磨损 系数 $K_i =$ $\sum C_j K_{zj} / C$
平均粒径 $d_j$ (mm)		0.005	0.0175	0.0375	0.075		
分组相对磨损系数 $K_{zj}$		0.608	0.952	1.160	1.350		
10 年	各粒径组 沙重含量 $C_j$ (%)	0.286	0.167	0.007	0.000	0.460	0.741
20 年		0.294	0.204	0.015	0.000	0.513	0.761
30 年		0.300	0.239	0.030	0.000	0.569	0.782
40 年		0.313	0.291	0.067	0.000	0.671	0.812
50 年		0.321	0.335	0.125	0.007	0.789	0.847

A.6 主要磨损部位的磨损量估算

A.6.1 主要磨损部位：导叶、转轮叶片出口。

A.6.2 主要磨损部位的特征流速：

- a) 导叶：34 m/s；  
b) 转轮叶片出口：41.4 m/s。

A.6.3 利用 A.4.4 中 0Cr13Ni5Mo 材料的磨损关系式，表 A.2、表 A.3 及流速值进行计算，主要磨损部位的磨损量估算结果见表 A.4。

表 A.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 <sup>3</sup> ）	K•K <sub>i</sub> （10 <sup>-9</sup> ）	T （h）	ΔH（mm / 年）	
				导叶（W=34m/s）	转轮（W=41.4m/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：其中 T 为机组汛期运行时间。					

A.6.4 根据表 A.4 磨损量估算结果及考虑其它影响磨损的因素，可判断该机组的磨损程度为中等偏

严重，需采取综合防护措施，除重点在水轮机设计与制造环节考虑减轻磨损的技术措施外，根据类似机型应用经验，建议设圆筒阀等措施。

---