

ICS 27.140

P 59

备案号: J417—2005

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5207 — 2005

**水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土
技 术 规 范**

**Technical specification for abrasion and cavitation
resistance of concrete in hydraulic structures**

2005-02-14 发布

2005-06-01 实施

中华人民共和国国家发展和改革委员会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	2
3 术语和定义	3
4 总则	4
5 水力学和水工设计	5
6 材料	9
7 施工	12
8 维护与修补	15
9 质量控制与验收	18
附录 A (规范性附录) 抗冲磨试验方法	21
附录 B (资料性附录) 泄水结构初生空化数 σ_c 估算值	25
附录 C (规范性附录) 抗空蚀试验方法	31
附录 D (规范性附录) 水工混凝土铁矿石骨料品质要求	34
附录 E (规范性附录) 水工混凝土铸石骨料品质要求	35
条文说明	37

前 言

本标准是根据原国家经济贸易委员会《关于下达 2001 年度电力行业标准制、修订计划的通知》（电力〔2001〕44 号文）的安排制定的。

水利水电工程中的泄水建筑物是涉及工程安全的重要建筑物。我国已建工程的泄水建筑物运行状况总体上是安全的，泄水建筑物混凝土受高速水流冲磨、空蚀等破坏现象常有发生，不仅直接或间接影响工程的安全正常运行，而且维护修补费用巨大。在总结我国几十年来对泄水建筑物抗冲磨防空蚀技术方面已取得的经验，参考国外有关标准和文献，进行必要补充试验的基础上制定本标准。

本标准的附录 A、附录 C、附录 D、附录 E 都是规范性附录，附录 B 是资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电施工标准化技术委员会归口并负责解释。

本标准主要起草单位：南京水利科学研究院。

本标准参加起草单位：中国水电工程顾问集团公司贵阳勘测设计研究院。

本标准主要起草人：林宝玉、郑治、蔡跃波、汪毅、卢红、李亚杰、张远曙。

1 范 围

本标准规定了水工建筑物抗冲磨防空蚀（以下简称抗磨蚀）混凝土工程的设计、施工、维修和运行的原则。

本标准适用于水流流速小于 40m/s 的大、中型水利水电工程 1、2、3 级泄水建筑物的设计和施工，4、5 级泄水建筑物的设计和施工可参照执行。对于流速大于等于 40m/s 的泄水建筑物的抗磨蚀问题，应做专门研究。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

GB/T 18736	高强高性能混凝土用矿物外加剂
GB 50204	混凝土结构工程施工质量验收规范
DL/T 5039	水利水电工程钢闸门设计规范
DL/T 5108	混凝土重力坝设计规范
DL/T 5110	水电水利工程模板施工规范
DL/T 5144	水工混凝土施工规范
DL/T 5150	水工混凝土试验规程
DL/T 5151	水工混凝土砂石骨料试验规程
DL/T 5166	溢洪道设计规范
DL/T 5195	水工隧洞设计规范
JGJ 53	普通混凝土用碎石或卵石质量标准 and 检验方法
JTJ 058	公路工程集料试验规程
JG/T 3064	钢纤维混凝土
SL 230	混凝土坝养护修理规程

3 术 语 和 定 义

3.0.1

空化 cavitation

水流中局部压力降低到水汽化压力时, 形成水蒸气气泡的现象。

3.0.2

空蚀 cavitation erosion

水流空化气泡溃灭时的瞬时压力对过流边界表面的剥蚀。

3.0.3

水流空化数 flowing cavitation number

流体内发生空化条件的无量纲参数, 以压力水头与流速水头之比表示。

3.0.4

初生空化数 initiative cavitation index

流体中开始出现空化时的临界水流空化数。

3.0.5

推移质 bed load

在河床表面附近以滑动、滚动、跳跃或层移方式运动的粒径大于 5mm 的块石泥沙。

3.0.6

悬移质 suspended load

悬浮在水流中随水流运动, 粒径小于等于 5mm 的泥沙。

3.0.7

含沙量 sediment concentration

单位流动水体中所含的悬移质泥沙质量。

3.0.8

掺气 aeration

在水流空化区掺入空气。

4 总 则

4.0.1 为了在泄水建筑物的设计和施工中做到安全适用、经济合理、技术先进，制定本标准。

4.0.2 大型工程和水力条件复杂的中型工程泄水建筑物，应进行水力模型试验，验证其布置和水力设计的合理性，选定合适的体形和运行方式。

4.0.3 水工抗磨蚀混凝土的设计与施工采用新技术、新工艺、新材料和新设备时，应经过充分论证并建立完善的质量保证体系。

4.0.4 水工抗磨蚀混凝土的设计、试验、施工、运行过程中，应经常进行技术分析和总结，提高技术水平。

5 水力学和水工设计

5.1 一般规定

5.1.1 泄水建筑物布置应符合 DL/T 5108、DL/T 5166、DL/T 5195 的有关规定，使其体形合理，流态平稳。

5.1.2 泄水建筑物泄槽（或洞身、孔身）段宜采用直线。如必须设置弯道段，应设在流速较小、水流平稳、缓坡的部位。平面布置弯道应采用大半径、小转角的弯道，弯道前后应设直线段，其直线段长度及转弯半径宜大于 5 倍泄槽宽度（洞径、洞宽）。纵剖面曲线应连续、平顺，当水流流速大于 25m/s 时，应通过水工模型试验，使体形简单合理，水流平稳，时均压力大，避免发生空蚀。

5.1.3 平面闸门门槽形式应按照 DL/T 5039 选用。

5.1.4 1、2 级泄水建筑物或流速大于 25m/s 时的泄水建筑物，其体形、结构尺寸及消能工，应通过水工模型试验确定。

5.1.5 峡谷地区泄水建筑物宜采用分散泄洪分区消能的方式，水流应立面扩散，纵向拉开，防止集中冲刷护坦和水垫塘的底板。

5.1.6 泄水建筑物易磨蚀部位应具备检查维修条件，设计应提出运行要求。

5.1.7 大体积或大面积抗磨蚀混凝土施工应进行温控防裂设计，制定温控标准。

5.2 抗冲磨设计

5.2.1 设计泄水建筑物时，在多泥沙河流应全面收集水流中的含沙量、泥沙颗粒形状、粒径、硬度、矿物成分、异重流运动规律等，推移质多的河流应收集推移质的数量和粒径及其运动方式，

在有冰凌的河流还应收集冰凌的大小及其运动方式等资料，分析其对混凝土表面的磨损影响。

5.2.2 有推移质河流低进口的取水建筑物宜在上游设置拦沙和导排措施。

5.2.3 在泄水建筑物进口附近和库首岸边应避免弃渣。应做好上下游围堰拆除的设计，防止石渣冲磨混凝土并导致空蚀。

5.2.4 在多泥沙河流的泄水建筑物进口附近宜设置排沙、沉沙设施。

5.2.5 泄水建筑物的边坡和出口岸坡应进行防护，防止掉石、滚石进入槽内，防止漩涡和环流挟沙石对消力池、护坦、水垫塘、尾水渠（管）等建筑物的严重磨损。

5.2.6 含推移质和多泥沙河流的闸坝泄水建筑物底板应采用一种坡度与护坦相接的急流泄槽形式。底流消能的消力池，应为无辅助消能工的护坦。

5.2.7 含沙高速水流方向和建筑物侧墙平面夹角大于 10° 时，应提高侧墙混凝土的强度等级。

5.2.8 抗冲磨混凝土钢筋保护层厚度不得小于 10cm，靠近表面的钢筋应平行于水流方向。

5.2.9 抗冲磨混凝土侧墙厚度不宜小于 20cm，底板厚度不宜小于 30cm。

5.2.10 含推移质水流速度大于 10m/s 或悬移质含量大于 20kg/m^3 （主汛期平均）且水流速度大于 20m/s 时，应根据工程条件选择附录 A 中的至少一种方法进行混凝土抗冲磨试验，比选抗冲磨材料。

5.3 防空蚀设计

5.3.1 泄水建筑物设计时，应选择合理体形，提高水流空化数 σ ，降低初生空化数 σ_1 ，使 $\sigma \geq \sigma_1$ 。放空洞、临时泄水建筑物（除导流洞和导流底孔的门槽外），易于检修的部位可采用 $\sigma \geq 0.85\sigma_1$ 。不同结构型式的 σ_1 估算值参见附录 B。对重要建筑物关键部位或水

流速度大于 35m/s 或 $\sigma < 0.3$ 时, 应进行减压模型试验。

5.3.2 应进行泄水建筑物沿程水流空化数计算, 见式 (5.3.2)。

$$\sigma = \frac{h_0 + h_d - h_v}{\frac{1}{2g} \cdot v_0^2} \quad (5.3.2)$$

式中:

σ ——水流空化数;

h_0 ——计算断面处的时均压力水头, m; 当水流流速大于 30m/s 时, 应计及脉动压力的影响;

h_d ——计算断面处的大气压力水柱, m; 对不同高程按 $h_d = (10.33 - \nabla / 900)$ 估算, ∇ 为海拔高度;

h_v ——水的汽化压力水柱, m; 按表 5.3.2 采用;

v_0 ——计算断面处水的流速, m/s; 可按实测流速分布图采用, 一般情况下, 取断面平均流速;

g ——重力加速度, m/s^2 。

表 5.3.2 水的汽化压力与水温的关系表

水温 T ℃	0	5	10	15	20	25	30	40
汽化压力 h_v m	0.06	0.09	0.13	0.17	0.24	0.32	0.43	0.75

5.3.3 泄水建筑物下列部位或区域易发生空蚀破坏, 应采取防空蚀措施:

- 1 闸门槽、堰顶附近、弯曲段、水流边界突变 (不连续或不规则) 处;
- 2 反弧段及其附近;
- 3 鼻坎、分流墩、消力墩;
- 4 水流空化数 $\sigma < 0.30$ 的部位。

5.3.4 应根据水流空化数的大小确定过流表面的不平整度处理

标准，见表 5.3.4。

表 5.3.4 表面不平整度处理标准

水流空化数 σ		>0.60	0.60~ 0.35	<0.35~ 0.30	<0.30~ 0.20		<0.20~ 0.15		<0.15~ 0.10		<0.10
掺气设施		—	—	—	不设	设	不设	设	不设	设	修改设计
突体高度控制 mm		≤ 25	≤ 12	≤ 8	<6	<15	<3	<10	修 改 设 计	<6	
处理 坡度	上游坡		1/10	1/30	1/40	1/8	1/50	1/10		1/10	
	下游坡		1/5	1/10	1/10	1/4	1/20	1/5		1/8	
	侧向坡		1/2	1/3	1/5	1/3	1/10	1/3		1/4	

5.3.5 水流空化数小于 0.30 或流速大于 30m/s 时，宜按下列原则设置掺气减蚀设施：

1 选用合理的掺气型式，组合式掺气应进行大比尺模型试验论证，确保形成稳定的空腔；

2 近壁层掺气浓度应大于 3%，要求特别高的部位应不低于 5%；

3 掺气保护长度根据泄水曲线型式和掺气结构型式确定，曲线段可采用 70m~100m，直线段可为 100m~150m，对长泄水道应考虑设置多级掺气减蚀设施。

5.3.6 1、2 级泄水建筑物流速大于 30m/s 的区域应进行混凝土抗空蚀强度试验（试验方法详见附录 C）与原型空化空蚀监测设计。

6 材 料

6.1 无 机 材 料

6.1.1 抗磨蚀护面材料应采用抗磨蚀性、体积稳定性（低热、低收缩）、工作性均优的高性能混凝土与砂浆。

6.1.2 配制高性能抗磨蚀的混凝土及砂浆所用材料除应符合 DL/T 5144 规定外，还应符合下列要求：

1 宜选用大于等于 42.5 强度等级的中热硅酸盐水泥、硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。

2 应选用质地坚硬、含石英颗粒多、清洁、级配良好的中粗砂。

3 应选用质地坚硬的天然卵石或人工碎石，天然骨料最大粒径不宜超过 40mm，人工骨料最大粒径可为 80mm，当掺用钢纤维时混凝土骨料最大粒径不宜大于 20mm。

4 应掺用高效减水剂，宜优先选用低收缩的聚羧酸盐等高效减水剂，有抗冻要求的应论证加入引气剂的必要性。

5 配制高性能混凝土时，应掺用 I、II 级粉煤灰，硅粉，磨细矿渣等活性掺合料。掺合料用量应通过优化试验确定，其品质应符合 GB/T 18736 的规定。

6.1.3 采用铁矿砂石骨料时，人工铁矿砂石的级配及其品质应符合附录 D 的规定。

6.1.4 采用铸石骨料时，人工铸石砂石的级配及其品质应符合附录 E 的规定。

6.1.5 掺用钢纤维时，所用钢纤维应符合 JG/T 3064 的有关规定。

6.2 有机材料

6.2.1 抗磨蚀护面有机材料可采用环氧树脂砂浆及混凝土、聚合物纤维砂浆及混凝土、不饱和聚酯树脂砂浆及混凝土、丙烯酸环氧树脂砂浆及混凝土、聚氨酯砂浆及混凝土等。

6.2.2 配制各类抗磨蚀树脂砂浆及混凝土应选用耐磨填料及骨料，例如石英砂、粉，铸石砂、粉，棕刚玉砂、粉，金刚砂、粉，铁矿砂、粉等，其配合比应通过试验确定。

6.3 材料选择

6.3.1 抗磨蚀混凝土的强度等级分 C35、C40、C45、C50、C55、C60、>C60 七级。

6.3.2 水流中冲磨介质以悬移质为主的工程，可根据最大流速和多年平均含沙量按表 6.3.2 选择混凝土强度等级，并进行抗冲磨强度优选试验。

表 6.3.2 抗悬移质磨蚀混凝土的强度等级

水流空化数 σ	>1.5	1.5~>0.6		0.6~0.3		<0.3	
水流流速 m/s	<15	15~25		>25~35		>35	
含沙量 kg/m ³	>2	≤2	>2	≤2	>2	≤2	>2
强度等级	C35~C40	C35	C40~C50	≥C40	C50~C60	≥C50	≥C60
注 1：排沙建筑物均应按含沙量大于 2kg/m ³ 选择混凝土强度等级。 注 2：当过流中推移质含量大于 2kg/m ³ 时，宜选用较表中提高 1~2 个强度等级的混凝土（以 5MPa 为 1 个等级）。 注 3：如建筑物投入运行前龄期大于 90d，可用 90d 强度作为设计等级强度。 注 4：如 σ 和流速不一致时，按等级偏高一级确定。							

6.3.3 各个等级抗磨蚀高性能混凝土都应通过配合比优化试验，选择抗磨蚀性、和易性、体积稳定性和经济性较优的配合比。配合比试验中应使用粉煤灰、硅粉、磨细矿渣，其最大掺量不应超过表 6.3.3 的规定。C50 以上混凝土宜选用 I 级粉煤灰，也可以选用需水量比 $\leq 100\%$ 、细度 $\leq 15\%$ 、烧失量 $< 3\%$ 的 II 级粉煤灰。

表 6.3.3 活性掺合料最大掺量

活性掺合料	占胶凝材料总质量 (%)
粉煤灰	25
磨细矿渣	50
硅粉	10
粉煤灰+磨细矿渣+硅粉	50
粉煤灰+硅粉	35

6.3.4 水流中冲磨介质以推移质为主的工程，应根据推移质粒径、流速等进行研究，选择抗磨蚀混凝土或其他抗磨蚀材料，如钢板、复合钢板、钢轨、条石、铸石板等。

6.3.5 使用有机材料时，应选用无毒或低毒、方便施工的原材料，所配成材料的线膨胀系数与基底混凝土线膨胀系数之比应小于 4。

7 施 工

7.1 混凝土配合比设计原则

7.1.1 抗磨蚀混凝土配合比设计中的配制强度应按式 (7.1.1) 计算:

$$f_{cu,0} = f_{cu,k} + 1.28 \sigma_c \quad (7.1.1)$$

式中:

$f_{cu,0}$ ——混凝土施工配制强度, MPa;

$f_{cu,k}$ ——设计要求的混凝土强度值, MPa;

σ_c ——混凝土强度标准差, MPa。

标准差 σ_c 由混凝土生产过程中质量管理水平确定, 应根据施工单位的历史统计资料计算得出, 无历史统计资料时, 对 C35~C50 抗磨蚀混凝土可取 $\sigma_c=5\text{MPa}$, 对 C55~C60 抗磨蚀混凝土, 配制强度取值应不低于设计强度等级的 1.15 倍; 对大于 C60 抗磨蚀混凝土, 配制强度取值应不低于设计强度等级的 1.12 倍。

7.1.2 抗磨蚀混凝土的配合比设计, 除应满足强度要求外, 还应进行抗磨蚀性能优化试验。

7.1.3 抗磨蚀混凝土水胶比应小于 0.4。

7.1.4 掺有硅粉的抗磨蚀混凝土, 应同时掺入补偿早期收缩的膨胀剂或减缩剂。

7.1.5 抗磨蚀混凝土拌和物的流动性, 应根据混凝土运输、浇筑方法和气候条件决定, 可按照 DL/T 5144 有关规定采用较小的坍落度。

7.1.6 抗磨蚀混凝土粗骨料级配及砂率的选择, 应在满足混凝土施工和易性要求的前提下, 选取密实度较大的粗骨料级配和最佳砂率。

7.2 施工技术要求

7.2.1 抗磨蚀混凝土施工应符合 DL/T 5144 有关拌和、运输、摊铺、振捣、养护、质量控制等规定。

7.2.2 抗磨蚀混凝土宜与基底混凝土同时浇筑，需分期浇筑时，应按设计要求施工。

7.2.3 强度等级大于 C50 的混凝土宜采用强制式搅拌机拌和，其投料顺序通过试验确定。

7.2.4 抗磨蚀混凝土的拌和时间，应较普通混凝土延长 30s~60s，掺钢纤维抗磨蚀混凝土应延长 60s~120s，或通过试验确定。

7.2.5 掺有硅粉的抗磨蚀混凝土的输送设备应及时清洗，避免黏结。

7.2.6 模板的制作和安装偏差应符合 DL/T 5110 的规定。保证泄水建筑物形体满足设计要求，过流面模板材料应符合表 7.2.6 的规定。

表 7.2.6 模板材料要求

水流空化数 σ	木 模	钢 模
>1.50	普通木板	一般钢模
1.50~0.60	表面光滑平整的木板	表面平整的钢模板，可采用拉模浇筑
<0.60~0.30	表面光滑平整的木板或胶合板	表面平整的钢模板拉模浇筑，可采用钢衬
<0.30~0.10	对平面可采用胶合板，对扭曲面可用无节疤或其他缺陷并能弯曲成扭曲面的胶合板，对显著扭曲部位，应采用容易连续弯曲的材料，如硬质纤维板、薄胶合板等	平面可采用表面平整的钢模板和钢衬

7.2.7 抗磨蚀混凝土浇筑后，应及时保温保湿，防止开裂。

7.2.8 溢流坝面、溢洪道等泄水边界抗磨蚀混凝土浇筑，可采用拉模、翻模等方法施工。

7.2.9 抗磨蚀混凝土施工前，必要时可在施工现场先进行工艺性试验。

8 维 护 与 修 补

8.1 一 般 规 定

8.1.1 根据建筑物的运行工况，对易遭受冲磨与空蚀破坏的混凝土结构应定期观测与检查，及时编写检测报告。

8.1.2 对冲磨与空蚀破坏现象应分析破坏的严重程度及产生原因，提出相应的治理措施，并及时修补。对破坏范围较大或破坏较严重的工程应进行修补设计，并于施工前进行生产性现场试验。

8.1.3 冲磨与空蚀破坏修补应选择工艺成熟、技术先进、经济合理的修补材料，并按有关规范和产品指南严格控制施工质量。

8.2 检 查 与 维 护

8.2.1 泄水建筑物运行时，应按设计要求进行水力学观测，并经常观测水流流态等，发现异常情况应及时记录并报告。

8.2.2 易遭受冲磨与空蚀破坏的部位应重点检查：闸门槽与底槛、溢流堰面、坡降突变部位、底板与边墙的交界部位、不同类型衬砌材料的连接部位、鼻坎、消力墩、消力池（塘）、护坦与基础连接部位等。

8.2.3 检查的主要内容应包括：

1 查明遭受磨蚀破坏的状况，分析破坏类型与原因，可按 SL 230 判别磨损和空蚀的主要原因；

2 检查判断消能工内残积物数量、分布范围及特征；

3 检查判断结构与基岩连接部位的破坏状况。

8.2.4 检查人员应在现场记录与描绘观测情况，并在检查结束后及时整理资料，提出检测报告。

8.2.5 检测报告应包括下列内容：工程名称、检查时间、检查组

成员、检查目的、主要被检查部位、检测结果、分析与结论，并对结构物的现状及修补工作的轻重缓急进行评估，提出下一步工作的具体建议。

8.2.6 当泄水建筑物经短期运行即发生较严重磨蚀破坏，或长期运行发生周期性、重复性破坏时，应重新审查与评估结构布置与体形设计的合理性，必要时通过模型试验再行论证；应检查溢流面体形和施工不平整度是否满足设计要求；应检测与评估护面材料的抗磨蚀性能以及不同护面材料间的接缝合理性；应检查运行方式是否恰当。

8.3 修 补 处 理

8.3.1 冲磨与空蚀破坏的修补应严格按修补设计要求执行。

8.3.2 修补材料的选择除应按 6.3 的规定执行外，还应符合与基底材料的线膨胀系数相近的要求。

8.3.3 修补区平均磨蚀深度小于 0.5cm，可选择净浆类材料，且不足 0.5cm 深的修补区至少应凿深至 0.5cm；修补区平均磨蚀深度小于 5cm，可选择砂浆类材料，且不足 3cm 深的修补区至少应凿除至 3cm；在 5cm~15cm 范围内，可选择一级配混凝土类材料，是否布置插筋应根据修补面积、厚度及修补材料与基底的黏结强度确定；大于 15cm 时，可选择二级配混凝土类材料，补焊钢筋，并加钢筋网或钢丝网，修补区边缘宜先切割轮廓线，构成凸多边形，其相邻两线的夹角应小于 90°。

8.3.4 修补区边缘不得形成深度小于 3cm 的边口。平面薄层修补区边缘应凿成齿槽状，立面修补的槽、孔宜凿成楔形状。

8.3.5 在修补施工前，必须彻底清除基面上已损坏、松动和胶结不良的表层混凝土、油污及杂质。采用无机材料修补，干燥基面修补前应浸水或保持湿润状态约 24h，修补前 1h~2h 清除积水；采用有机材料修补，基面处理应按有关规定或要求进行。

8.3.6 修补区有钢筋出露并锈蚀时，修补前应进行除锈处理。如

钢筋面积明显减小或被冲断,应补焊受力筋并加设必要的连接筋。对冲蚀破坏的预埋件,应予修复。

8.3.7 平均厚度小于 15cm 的修补区,应在基面涂刷与修补材料同类的净浆、聚合物水泥净浆或其他适宜的黏结材料,并在黏结材料初凝前铺筑修补材料。

8.3.8 修补区存在渗水时,修补前必须先行堵漏或改流,并清除积水。

8.3.9 磨蚀破坏修补宜采用低流动度的砂浆或混凝土,铺筑过程中应充分振捣并及时抹面。抹面时应反复压抹、拍打,且不应在抹面时加水。也可采用预缩或二次振捣施工工艺。

8.3.10 磨蚀破坏修补应严格控制修补区的高程、平整度及与未修补区的平顺连接。

8.3.11 在抹面后,对修补砂浆或混凝土表面应立即喷洒养护剂或喷雾养护。修补材料终凝后,应及时覆盖保湿,按 DL/T 5144 规定养护至规定天数。

8.3.12 修补工作应具备满足不同修补材料与工艺所要求的环境条件。

9 质量控制与验收

9.1 质 量 控 制

9.1.1 水工抗磨蚀混凝土设计与施工的质量控制除应符合本标准的有关规定外，还应符合 GB 50204 和 DL/T 5144 的有关规定。

9.1.2 质量控制项目应包括：

- 1 泄水建筑物的体形；
- 2 过水表面混凝土的平整度；
- 3 混凝土的原材料及其配合比；
- 4 混凝土的施工方法与工艺；
- 5 混凝土的表面保护与防止裂缝；
- 6 残渣杂物等的清理；
- 7 混凝土的抗压强度。

9.1.3 质量检查内容应包括：

- 1 过流表面、掺气设施与消能工等的定线放样准确性；
- 2 模板的光滑平整度及纵横支撑的稳定可靠性；
- 3 受力钢筋、构造钢筋、架立筋的分布合理性；
- 4 拆模前后施工缝或伸缩缝的接口平整度；
- 5 钢筋保护层的厚度及拆模后钢筋头的切割处理；
- 6 混凝土表面突体高度与磨平坡度；
- 7 混凝土养护措施与实施；
- 8 混凝土原材料、外加剂与掺合料的质量；
- 9 泄水建筑物区内残渣、杂物的清理状况；
- 10 混凝土质量缺陷及其处理。

9.1.4 泄水建筑物抗磨蚀混凝土每 500m^2 过流表面应取不少于两组试件做抗压强度试验，不少于一组试件做抗冲磨强度试验；每

级混凝土应取不少于一组试件做抗空蚀强度试验。对于小于 500m² 的磨蚀修补部位可根据工程条件，确定试验项目。

9.2 验 收

9.2.1 抗磨蚀混凝土工程的验收，应按照 GB 50204 及本标准的有关规定进行。

9.2.2 抗磨蚀混凝土工程的验收应提交下述资料：

- 1 设计图纸和施工技术要求；
- 2 竣工图：包括平面图、过流表面曲线、掺气设施和消能工形体、过流横断面（每 5m～10m 测一个）等；
- 3 表面不平整度实测资料与评价；
- 4 混凝土原材料及其配合比、抗压强度、抗磨蚀强度的试验成果；
- 5 施工质量检查报告；
- 6 水工模型试验与减压箱等专项的试验成果；
- 7 其他有关资料。

9.2.3 验收时应抽查低水流空化数区域的混凝土强度、表面不平整度及其处理情况，并作出评价。

9.2.4 验收标准：

- 1 泄水建筑物的布置、过水断面形体及结构尺寸应符合设计要求；
- 2 混凝土表面突体高度和处理坡度应符合设计要求；
- 3 泄水建筑物区域内及其附近的残积物已清除干净；
- 4 原材料符合国家和行业的有关规定；
- 5 过水表面混凝土抗压强度同时符合式（9.2.4-1）、式（9.2.4-2）要求，可评为合格：

$$\overline{f_{cu}} \geq f_{cu,k} + 0.74\sigma_c \quad (9.2.4-1)$$

$$f_{cu,min} \geq 0.90f_{cu,k} \quad (9.2.4-2)$$

式中:

$\overline{f_{cu}}$ ——同一验收批混凝土立方体抗压强度平均值, MPa;

$f_{cu,k}$ ——设计要求的混凝土强度值, MPa;

$f_{cu,min}$ ——同一验收批混凝土立方体抗压强度最小值, MPa;

σ_c ——混凝土强度标准差, MPa。

附 录 A
(规范性附录)
抗 冲 磨 试 验 方 法

A.1 水下钢球冲磨试验方法

按 DL/T 5150 “混凝土抗冲磨试验（水下钢球法）”进行。

A.2 风砂枪冲磨试验方法

按 DL/T 5150 “混凝土抗冲磨试验（风砂枪法）”进行。

A.3 含沙水流冲磨试验方法

按 DL/T 5150 “混凝土抗含沙水流冲刷试验（圆环法）”进行。
但强度等级大于 C40 的混凝土不宜采用。

A.4 水沙磨损机试验方法

A.4.1 目的、适用范围及原理

A.4.1.1 目的及适用范围：测定混凝土抵抗高速含沙水流的冲磨能力，用于评价混凝土或其他材料的抗磨性能。

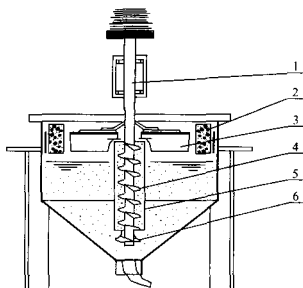
A.4.1.2 原理：具有一定含沙量的水体，经由抽水叶片、螺旋叶片和分水叶片的作用，形成高速含沙水流喷射到试件表面，对材料产生冲磨作用。

A.4.2 主要仪器设备

A.4.2.1 旋转式水沙磨损机：结构如图 A.1 所示。

A.4.2.2 磨损机主要技术参数如下：

1 旋转轴：标准转速为 1320r/min。根据需要，可采取机械或电气手段改变旋转轴转速，达到改变含沙水流冲磨速度的目的。



1—旋转轴；2—试件；3—分水叶片；4—螺旋叶片；

5—吸水筒；6—抽水叶片

图 A.1 旋转式水沙磨损机结构示意图

2 分水叶片：四片垂直固定在旋转轴上，外缘半径 208.6mm。当旋转轴转速为 1320r/min 时，含沙水流圆周切线速度（冲磨速度）为 28.8m/s。

3 螺旋叶片：固定在旋转轴上，直径 80mm，间距 30mm。

4 吸水筒：直径 110mm，高度 350mm。

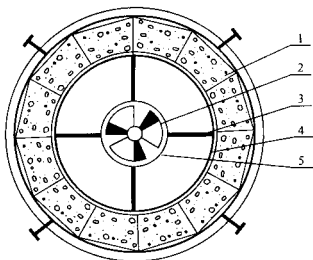
5 电动机：4.0kW，额定转速 1440r/min，通过三角皮带与旋转轴相连。

A.4.2.3 天平：称量 10kg，感量 0.1g。

A.4.2.4 磨料：福建平潭硬练石英砂，粒径范围 0.63mm~0.16mm。

A.4.2.5 混凝土试件：高度 150mm，厚度 96mm，内侧面圆弧半径 212mm，弧长 111mm。试件受冲磨高度 90mm，每块试件受冲磨面积 100cm²。

混凝土试件以三块为一组，每次试验可同时进行四组试件的平行试验。试件形状及排布如图 A.2 所示。



1—试块；2—旋转叶片；3—分水叶片；4—试块搁环；5—吸水筒

图 A.2 混凝土试件及其排布示意图

A.4.3 试验步骤

A.4.3.1 混凝土拌和物拌和及试件成型与养护，按 DL/T 5150 中有关规定进行。

A.4.3.2 到达试验龄期前两天，将试件放入水中浸水饱和。

A.4.3.3 向试验机内注足水及磨料。

磨耗介质标准含沙率 = $\frac{\text{磨料沙}}{\text{水} + \text{磨料沙}} = 3.0\%$

根据需要，可以增减含沙率值，但含沙率最大值不得超过 6%，并应在报告中注明。

A.4.3.4 试验时，从水中取出试块，用湿毛巾抹去表面水分，使呈饱和面干状态。称其质量，准至 0.1g，记录为冲磨前质量。

A.4.3.5 将试块放于试块搁环上，并使其弧面紧贴内环沿。调整内弧面的平整度，上紧固紧螺丝，盖上橡皮垫圈，紧固盖板螺丝。

A.4.3.6 启动电动机，并记录冲磨起始时间。

A.4.3.7 每冲磨 60min 后，停机取出试件。用水将其冲洗干净，抹去表面水分，称其质量，准至 0.1g，记录为冲磨后质量。测量其被冲磨的宽度和深度，并予以记录。

A.4.3.8 更换磨耗介质（水及磨料沙同时更换）。按前述步骤重复试验 10 次（即累计冲磨 10h），试验结束。若试件冲磨深度大于等于 5mm，也可结束试验。根据需要，可适当增加试验次数，并应在报告中注明。

A.4.4 试验结果处理

A.4.4.1 混凝土抗含沙水流冲磨磨损率，按式（A.1）计算：

$$N = (M_0 - M_t) / St \quad (\text{A.1})$$

式中：

N ——磨损率，单位面积上在单位时间内被磨损的质量， $\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ；

M_0 ——试件冲磨前质量， kg ；

M_t ——历时 t 小时冲磨后试件的质量， kg ；

t ——试件受冲磨累计历时， h ；

S ——试件受冲磨面积， m^2 ；对于标准试件，受冲磨面积为 0.01m^2 。

A.4.4.2 混凝土抗含沙水流冲磨强度 R ($\text{h} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$)，即单位面积上每磨损 1kg 所需小时数，按式（A.2）计算：

$$R = 1/N \quad (\text{A.2})$$

A.4.4.3 以一组三块试件测值的算术平均值作为试验结果。当单个测值与平均值之差值超过平均值的 15% 时，则此值应予剔除，取两个测值的平均值作为试验结果。若一组中可用的测值少于两个时，该组试验应重做。

附录 B

(资料性附录)

泄水结构初生空化数 α 估算值B.1 泄水结构初生空化数 α 估算参见表 B.1。表 B.1 泄水结构初生空化数 α 估算值

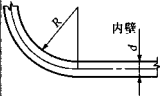
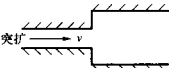
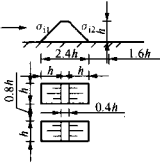
序号	结构型式		初生空化数 α	备 注
1	隧洞进水口	曲面逐渐收缩	≥ 0.50	优化长短轴比例、长轴和洞高比例
		顶、侧面椭圆曲线	0.45~0.10	
2	闸门槽	I 型	0.50~1.00	
		II 型	0.40~0.80	
3	弯 道	$R=2d$	1.37	
		$R=3d$	1.20	
		$R=4d$	0.90	
		$R=5d$	0.40	
4			有压 0.70	
			无压 0.62	
5	消能工与分流墩		$\alpha_1=2.10$ $\alpha_2=1.40\sim 1.60$	

表 B.1 (续)

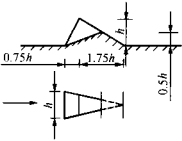
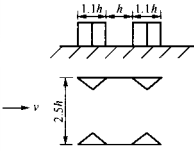
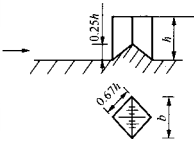
序号	结构型式	初生空化数 σ	备 注
5		1.40~1.60	
	消能工与分流墩 	0.90~1.15	
		0.70~0.85	

表 B.1 (续)

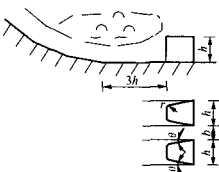
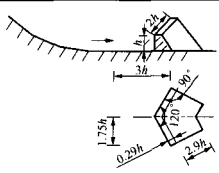
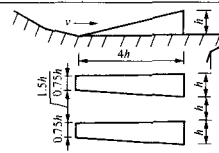
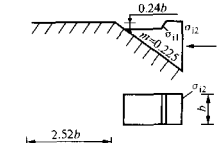
序号	结构型式	初生空化数 α	备 注
5	消能工与分流墩		$\theta=0^\circ$ $b=0.37h$ $r/h=0$
		1.20	$\theta=5^\circ$ $b=0.3h$ $r/h=0$
		0.95	$\theta=5^\circ$ $b=0.3h$ $r/h=0.13$
		0.95	
		0.68	
		$\alpha_1=2.44$ $\alpha_2=2.20$	m 为坡度 

表 B.1 (续)

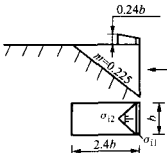
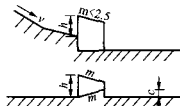
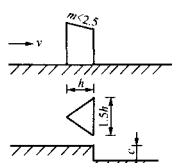
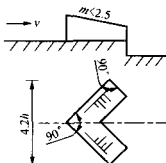
序号	结构型式	初生空化数 σ	备 注
5		$\sigma_1 = \sigma_2 = 1.60$	m 为坡度
		1.75	$c \leq 0.015 \frac{v^2}{2g}$
		0.90 ~ 1.15	$c \geq 0.015 \frac{v^2}{2g}$
		0.80 ~ 1.05	

表 B.1 (续)

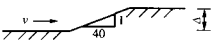
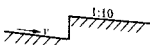
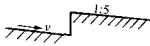
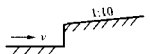
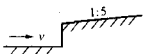
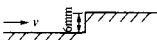
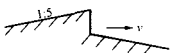
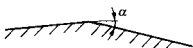
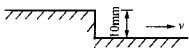
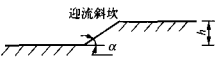
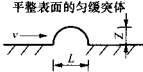
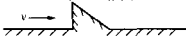
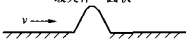
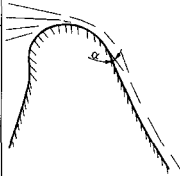
序号	结构型式	初生空化数 α	备 注	
6		0.20	$\Delta \leq 6\text{mm}$	
7		0.20	$\Delta \leq 6\text{mm}$	
8	升 坎		2.30	二元流直立升坎
			2.00	
			2.00	
			1.80	
			1.20	
9	跌 坎		1.10	二元流直立跌坎
			0.95	
			1.05	$\alpha > 5^\circ$
			1.00	

表 B.1 (续)

序号	结构型式	初生空化数 α	备 注
10		$0.466\alpha^{1/3}$	α 以度计 ($5^\circ < \alpha < 90^\circ$)
11		$2.24 \left(\frac{Z}{L}\right)^{-0.5}$	如焊缝、混凝土瘤等
12		2.0	如模板接缝处理不严格
13		1.5~2.0	
14		3.0~4.0	
15		0.30	
		0.85	
		1.25	

附录 C

(规范性附录)

抗空蚀试验方法

C.1 目的及适用范围

C.1.1 测定混凝土(或砂浆)表面受高速水流产生的空蚀作用下的相对抗力,用于评价混凝土(或砂浆)的相对抗空蚀性能。

C.2 仪器设备与试件

C.2.1 缩放型空蚀发生器:见图 C.1。

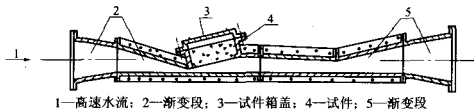


图 C.1 缩放型空蚀发生器示意图

C.2.2 天平:称量 20kg,感量 0.01g。

C.2.3 试件:混凝土(或砂浆)试件断面尺寸为 200mm×100mm×100mm,两侧各有一台阶,见图 C.2。

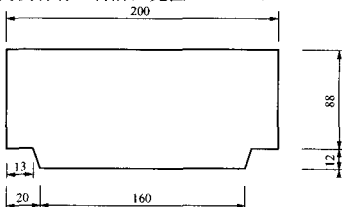


图 C.2 抗空蚀试件尺寸 (单位: mm)

C.3 试验步骤

C.3.1 按 DL/T 5150 的要求制备试件，允许骨料最大粒径为 20mm，试验以 3 个试件为一组。

C.3.2 试验前，试件需在水中至少浸泡 48h。

C.3.3 试验时，取出试件，擦去表面水分，称量。

C.3.4 将试件放入空蚀箱中，在箱盖间垫上止水橡皮垫圈，并用螺栓固定使其密封。

C.3.5 开启水阀，待灌满整个缩放管后，关水阀，启动水泵电动机，使水流由蓄水池吸入加压后流经工作段，通过调节旁通道阀门（可通过观察压力表及阻尼装置）控制水流流速在 48m/s（断面平均流速）的工作状况，调好工况后即开始计时。

C.3.6 累计开机 8h，取出试件，清洗干净，擦去表面水分，称量。

C.4 试验结果处理

C.4.1 混凝土（或砂浆）抗空蚀指标以抗空蚀强度或蚀损率表示。

C.4.1.1 抗空蚀强度按式（C.1）计算：

$$R = \frac{tA}{Q} \quad (\text{C.1})$$

式中：

R ——抗空蚀强度，即单位面积上被空蚀单位质量所需时间， $\text{h} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ；

t ——试验累计时间，h；

A ——试件受蚀面积， m^2 ；

Q ——经 t 时段空蚀后，试件损失的累计质量，kg。

C.4.1.2 蚀损率按式（C.2）计算：

$$L = \frac{M_0 - M_t}{M_0} \quad (\text{C.2})$$

式中:

L ——蚀损率, %;

M_0 ——试验前试件质量, kg;

M_t ——试验后试件质量, kg。

C.4.2 以一组三块试件测值的算术平均值作为试验结果。当单个测值与平均值之差值超过平均值的 15% 时, 则此值应予剔除, 取两个测值的平均值作为试验结果。若一组中可用的测值少于两个时, 该组试验应重做。

附录 D

(规范性附录)

水工混凝土铁矿石骨料品质要求

D.1 定义

D.1.1 含石英等结晶矿物的天然铁矿石，经人工破碎、筛分后，按一定级配组成的坚硬的铁矿砂或碎石骨料。

D.2 品质指标

D.2.1 化学成分： Fe_2O_3 （ 65 ± 5 ）%； SiO_2 （ 20 ± 5 ）%； Al_2O_3 （ 5 ± 2 ）%。

D.2.2 骨料碱活性检验：按 DL/T 5151 检验，评定为非活性骨料。

D.2.3 颗粒级配：符合 DL/T 5144 有关砂、石骨料级配的规定，或按用户要求。

D.2.4 物理力学性质：应符合表 D.1 的要求。

表 D.1 铁矿砂石骨料物理力学性质指标

项 目	单 位	指 标	项 目	单 位	指 标
密度	g/cm^3	≥ 4.0	磨损硬度	cm^3/cm^2	≤ 0.08
吸水率	%	≤ 1.0	冲击韧性	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{cm}^3$	≥ 300.0
压碎率	%	≤ 7.5	磨耗率 (Deval 法)	%	≤ 5
抗压强度	MPa	≥ 250.0			

D.2.5 各项力学性质的试验方法如下：

压碎率：按 JGJ 53 规定执行。

抗压强度、磨损硬度、冲击韧性、磨耗率等：按 JTJ 058 的有关试验方法执行。

附 录 E

(规范性附录)

水工混凝土铸石骨料品质要求

E.1 定义

E.1.1 辉绿岩、玄武岩及各种工业废渣铸石是以天然岩石或工业废渣为主要原料，加入一定的附加料及结晶剂，经熔融、浇注成型、结晶、退火而制成的硅酸盐结晶材料。作为混凝土骨料，系生产各种制品时的破裂废品，经破碎、筛分，具有一定粒径的人造骨料，分为铸石碎石及铸石砂两种。

E.2 品质指标

E.2.1 化学稳定性：耐酸、碱指标应符合表 E.1 的规定。

表 E.1 铸石耐酸、碱度指标

项 目	浓硫酸（化学纯， GB 625—77，95%~98%）	20%硫酸（化学纯， GB 625—77）	20%氢氧化钠（化学纯， GB 629—77）
指 标	≥99%	≥96%	≥98%

E.2.2 骨料碱活性检验：按 DL/T 5151 检验，评定为非活性骨料。

E.2.3 颗粒级配：符合 DL/T 5144 有关砂、石骨料级配的规定，或按用户要求。

E.2.4 物理力学性质：应符合表 E.2 的要求。

表 E.2 铸石砂石骨料物理力学性质指标

项 目	单 位	指 标	项 目	单 位	指 标
密度	g/cm ³	≥2.9	磨损硬度	cm ³ /cm ²	≤0.08

表 E.2 (续)

项 目	单 位	指 标	项 目	单 位	指 标
吸水率	%	≤ 0.5	冲击韧性	$\text{N} \cdot \text{m}/\text{cm}^2$	≥ 3.0
压碎率	%	≤ 10.0	莫氏硬度		7.0~8.0
抗压强度	MPa	≥ 250.0	—		—

E.2.5 各项力学性质的试验方法与 D.2.5 相同。

水工建筑物抗冲磨防空蚀 混凝土技术规范

条 文 说 明

目 录

1	范围	39
4	总则	40
5	水力学和水工设计	41
6	材料	54
7	施工	65
8	维护与修补	68
9	质量控制与验收	70

1 范 围

对水工建筑物破坏情况大型调查结果表明：在已建大中型水电工程中有近 70% 存在冲磨空蚀破坏，其原因涉及设计、施工和管理各个方面。目前国内现有规范都未对水工建筑物抗冲磨防空蚀混凝土技术问题给予明确规定，一般设计标准偏低。考虑到近 50 年来我国对泄水建筑物的抗磨蚀设计以及对抗磨蚀材料的研究和应用已积累一定经验，为统一水电水利工程混凝土抗冲磨防空蚀技术标准，提高设计、施工、维修和管理水平，特制定本标准。

流速大于等于 40m/s 的泄水建筑物的抗磨蚀问题，目前还缺少实践经验，故本标准规定应专门研究。

4 总 则

4.0.2 大型工程有条件进行水工模型试验，但中型工程由于各种原因往往不进行水工模型试验。对于水头大于 50m 或流速大于 25m/s 的泄水建筑物，峡谷地区的水利枢纽布置设计比较复杂，其体形和纵向曲线形状、参数、结构尺寸等，通过水工模型试验、修改是比较合理的。

4.0.4 水工混凝土抗冲磨防空蚀的强度，受骨料的影响很大，工程应用的骨料品种繁多，有天然骨料和人工骨料。石灰岩、花岗岩、玄武岩、白云岩等均可作为骨料，分类统计其抗磨损强度、防空蚀强度缺乏规律性。水流冲磨能力受流速、含沙量、泥沙粒径、冲刷历时等诸多因素影响，难以公式化描述。水流空化数受水动力因素、水质、水热力学等因素影响，其量测结果也只是一个相对标准。鉴于上述情况，提出水工混凝土抗冲磨强度标准和防空蚀强度标准尚有困难，需设计、施工、试验单位在工程实践中注重资料分析和总结。

5 水力学和水利设计

5.1.2 在无压流中,水流转弯容易形成折冲水流、冲击波,流态极不平稳,易产生冲刷,应尽量避免转弯。有时限于地形和水流衔接,必须设置弯道时,弯道前后应设直线段,其长度大于5倍泄槽宽度时,实践证明是可行的。在水流速度大于15m/s时,弯道流态受转弯半径和转角的影响较大,宜通过水工模型试验确定弯道的横向倾斜和上、下游过渡段的体形与长度。国内对流速25m/s以下的泄水建筑物设计已积累了丰富的经验,DL/T 5166也有明确规定,只要参照有关工程的设计成果,执行有关规定,即能满足抗冲磨防空蚀的要求。而流速大于25m/s的泄水建筑物,国内外均有不少受磨蚀破坏的工程实例,均属体形不佳所致,见表1。对有局部开启的高水头低堰,为防止堰面脱流,可采用超空穴突跌型式过渡。

表1 泄水建筑物冲磨空蚀破坏实例

序号	工程名称	泄水建筑物及尺寸 孔数-宽×高 或洞径 m	流速 m/s	运行情况	主要原因	修复情况
1	柘溪	坝顶溢洪道 9-12×9	31	鼻坎侧面空蚀破坏	体形不佳,坎和槽挑角差不合理	鼻坎改为梯形差动式,增设鱼尾坎后,运行良好
2	安砂	坝顶溢洪道 3-16×14.5	—	鼻坎反弧末端有冲蚀坑	鼻坎体形差	增设通气孔,磨圆鼻坎棱角,效果良好
3	刘家峡	左岸泄水道 2-3×8	35	磨蚀面积7689.6m ²	磨损与空蚀联合破坏	检修12次
4	龙羊峡	底孔 1-15×7	36	严重冲蚀,深2.5m,面积441.6m ² ,混凝土260m ³	通气量不足,表面不平整	严格控制施工平整度

表 1 (续)

序号	工程名称	泄水建筑物及尺寸 孔数-宽×高 或洞径 m	流速 m/s	运行情况	主要原因	修复情况
5	柘林	岸边陡槽式溢洪道 3-12×7.5	28	消力池多处冲坑	消能设施体形欠佳	多次修补, 破坏屡有发生
		放空洞 $\phi 8.0$	24	消力池边墙、底板、梳齿消力墩多处破坏	体形不佳	修复后反复发生破坏
6	响洪甸	泄洪洞 $\phi 7.0$	27	严重空蚀, 深 15cm	出口体形不佳	—

5.1.3 已建工程平面闸门采用矩形门槽居多, 运行实践表明: 除水头 15m 以下的门槽较少破坏外, 水头较高时, 门槽型式选用不当, 空蚀破坏的实例屡见不鲜, 见表 2。这些门槽均为矩形方角的 I 型门槽。深宽比大于 2.4 或小于 1.4, 初生空化数 σ_1 大, 当水流空化数 σ 较小时, 易发生空蚀。本标准统一采用水流空化数来判断。

表 2 部分泄水建筑物门槽空蚀破坏实例

序号	工程名称	门槽型式		闸门尺寸 宽×高 m×m	工作水头 m	运行 历时	空蚀情况
		形状	宽深比				
1	官厅	矩形方角	3.13	1.75×1.75	50 $H_{\max}=35.72$ $v_{\max}=24.4\text{m/s}$	6882 小时	泄洪洞 3 号闸下游青铜水封底板有空蚀麻点, 下部较严重, 似蜂窝, 一般深 5mm, 闸门底缘磨损, 深约 3mm~5mm
2	刘家峡	矩形缺角	1.33	3.0×8.0	70 $H_{\max}=57$	4 年	左岸泄水道门槽主轨发生空蚀, 长 6m, 宽 0.19m, 最深 15mm

表2 (续)

序号	工程名称	门槽型式		闸门尺寸 宽×高 m×m	工作水头 m	运行 历时	空蚀情况
		形状	宽深比				
3	盐锅峡	矩形 方角	2.50	4.0×9.0	27	130 天	8 号孔空蚀量达 141.2m ³
4	柘溪	矩形 方角	3.20	12.0×9.0	17 $H_{\max}=16.81$	8 年	溢流坝门槽下游 2m×2m 范围内空蚀, 深 250mm
5	响洪甸	矩形 方角	1.36	3.0×7.0	$H_{\max}=56$	23 小时	泄洪隧洞门槽下游上部 发生严重空蚀, 坑为 2.6m ×0.6m, 深 190mm, 钢筋 拔出
6	梅山	矩形 方角	2.44	2.5×2.5	70 $H_{\max}=55$	2.7 万 小时	泄水底孔闸门槽顶部外 缘和侧面离顶部 0.5m 处空 蚀宽 0.15m, 深 50mm
注: $H_{\max}$ 、 $v_{\max}$ 为已运行的最大水头和流速。							

I 型门适用于 $\sigma_1 \geq 1.0$, 相当于水头低于 30m 或流速小于 20m/s。II 型门槽带错矩、倒角、斜坡, 适用于 $1.0 > \sigma_1 \geq 0.6$ 的水力状态, 相当于水头 30m~50m, 流速 15m/s~25m/s。当 $\sigma < 0.6$, 或门槽附近边界条件特殊, 流态复杂或要求经常开启的门槽, 需要进行水工模型试验不断修正, 并做减压箱或高速循环水洞试验测定 σ_1 , 亦可通过水工模型试验, 测定最小压力系数, 以其绝对值近似代替 σ_1 。根据实际门槽附近的 σ , 使 $\sigma > k\sigma_1$, 则此类门槽型式一般不至于发生空蚀。 k 为安全系数, 可由闸门的重要性及工作条件选取, 一般为 1.1~1.5。当 $\sigma < 0.6$ 时, 还应根据闸门的重要性, 在门槽的上、下游一定范围内采用钢板衬护或其他抗磨蚀性能较强的材料衬护, 施工时要求形体准确, 表面平整。

如难以满足 $\sigma > k\sigma_1$ 的要求, 应研究采用弧型闸门的必要性。

I、II 门槽型式和几何形状、参数可见 DL/T 5039 附录 C。

5.1.4 已建工程消能工受磨蚀破坏的事例较多, 如柘林工程泄洪

洞趾墩与护坦，柘溪工程溢流坝鼻坎，黄坛口、盐锅峡工程的消力池，安砂工程溢流鼻坎，美国大约瑟夫工程溢流坝消力墩，大古力工程溢洪道鼻坎等均由于设计体形不合理，水流空化数较小造成破坏，改建时进行必要的水工模型试验，取得了良好效果。随着工程规模不断扩大，出口消能工的新型式也不断出现，如扩散型、收缩型（窄缝式）、分流（宽尾）墩、异型（折线形、扭曲形、曲面贴角）鼻坎等，其体形和水力特性都比较复杂，故本条规定应经过水工模型试验，选用初生空化数较小的出口消能工体形。

水头大于 50m 或水流速度大于 25m/s 都已属于高流速的范畴，出口消能和防冲是工程界普遍关心的问题，应进行必要的水工模型试验。

内部消能工在国内外已有工程应用，如国内小浪底工程的孔板洞型式，国外罗贡工程的漩流式等，但此类工程不多，内部消能工结构复杂，有待进一步实践总结。

5.1.5 高山峡谷地区适宜修建高坝，消能防冲的问题比较突出。近年来工程实践表明，采用坝身泄洪和岸边开敞式溢洪道、长泄洪洞联合泄洪方式，将水流沿河道纵向拉开，可防止水流对护坦或水垫塘底板的集中冲刷，避免河床较弱基岩的冲刷，优选消能工型式，如宽尾墩，将水流立面扩散，充分掺气，是合理的消能方式。

5.1.6 已建工程运行实践表明，即使设计精确，施工工艺严格，混凝土材料的抗磨蚀性能也较高，但长期运行结果，由于某些不可预见的因素，泄水建筑物混凝土表面总有不同程度的磨损或空蚀。为了避免破坏范围的扩大，需要不断检查与维修，故在工程设计时就应考虑运行时如何进行检查和维修。

有些泄水工程由于运行方式不当，如闸门长期局部开启（鲁布格工程）、不对称开启（八盘峡、红石工程）或开启频繁（黄坛口工程）、溢流表面杂物碎石长期不清理等，致使混凝土表面受到

严重破坏，故在泄水建筑物投入运行前，应编制运行管理要求，提出允许开启的开度与时间、程序、定期检查清理等要求，对于延缓与避免混凝土的破坏是非常必要的。

5.1.7 小浪底、二滩、紫坪铺等工程泄洪洞衬砌采用硅粉混凝土，产生裂缝较多。经分析，系水泥用量过多又未采取温度控制措施所致。大体积和大面积的抗磨蚀混凝土可采用硅粉类混凝土，由于水泥用量较多，早期收缩值较大，容易发生早期塑性开裂，需进行配合比优化试验和温控分析，采取温控防裂措施，如埋设冷却水管、加强表面保温保湿等。

5.2.1 含沙水流对混凝土过流面的磨损强度，可用下式表示：

$$\delta \propto k \cdot C^m \cdot v^n \cdot d^s \cdot R^j \cdot T \quad (1)$$

式中：

δ ——平均磨蚀深度，mm；

C ——含沙量，kg/m³；

v ——水流平均速度，m/s；

d ——泥沙粒径，mm；

R ——混凝土抗压强度，MPa；

T ——过水历时，h；

k ——与泥沙颗粒形状和矿物成分有关的系数（按三门峡工程观测资料， k 为 0.42×10^{-12} ）；

m 、 n 、 s 、 j ——系数， $m=0.7 \sim 1.0$ ， $n=2.7 \sim 4.0$ ， $s=0.7 \sim 1.0$ ， $j=-1$ 。

含沙水流的磨蚀是非常复杂的物理力学现象，至今尚难以用一个公式来表达。收集泥沙的含沙量、颗粒形状、粒径、矿物成分及硬度等资料，可作为模拟试验、工程类比设计的依据，也为研究泥沙的磨蚀机理积累资料。泥沙的硬度以大于 5 度（莫氏）控制，泥沙的有效磨损粒径，对钢板取 0.04mm 已为工程技术人员采用，对混凝土尚缺乏工程实践经验。原水电部十一局设计院科研所和武汉大学做了大量试验，提出表 3，可供工程设计参考。

表3 不同沙速对混凝土的有效磨损粒径 mm

沙 速 m/s		5.0	10.0	15.0	20.0	30.0	40.0
混 凝 土 强 度 等 级	C20	0.410	0.073	0.026	0.013	0.005	0.002
	C30	0.790	0.139	0.050	0.025	0.009	0.004
	C40	1.280	0.226	0.082	0.040	0.015	0.007

推移质以滑动、滚动及跳动的方式在建筑物表面运动，除摩擦作用外，还有冲击作用，需要收集其数量、粒径及运动方式等资料。

水库悬移质泥沙异重流现象是近年的研究成果，乌江渡水库3年~5年异重流已至坝前，东风水库因在低水位下运行，一年便到达坝前，其泥沙形态将明显影响低进口泄水建筑物混凝土表面的抗磨蚀能力。冰凌的磨蚀作用类似于推移质，其大小及运动方式影响混凝土表面的抗磨蚀能力，但这方面的资料较少，需要进一步收集分析。

5.2.2 在山区峡谷地区兴建的径流式电站，泄水建筑物进口较低，一般都接近河床，易受推移质作用而损坏，如石棉二级、南桡河三级、渔子溪二级等工程。推移质都是随山洪奔流入库，如在沟口附近设置一些谷仓、拦石墙，可有效阻止推移质入库。当发现谷仓被填满，应在运行期按时搬除，这对防止推移质对混凝土的损坏将起重要作用，可大大延缓甚至避免其破坏。

5.2.3 抗磨蚀混凝土工程的设计可采用工程类比法。已建工程由于施工废渣、上下游围堰拆除不干净，水流将砂、石卷入泄水建筑物而引起的磨损破坏是比较普遍的，如石泉、碧口、刘家峡、陆水、官厅、三门峡、黄坛口、二龙山、美国的大约瑟夫工程等。显然，小型水库应避免在库区弃渣，上下游围堰在泄水建筑物投入使用前应彻底清除，避免水流漩滚砂石对混凝土的严重磨损是

非常必要的。

5.2.4 在多泥沙河流设置排沙孔、沉沙池等，在初汛来临时及时排沙，对泄水建筑物的抗磨蚀可起积极作用，同时也延长水库的使用寿命。当然，对排沙孔也要做好抗磨蚀设计，但由于泄量小、断面小，磨损面有限，也便于检修。排沙孔也可兼作泄水孔。

5.2.5 泄水建筑物沿程边坡（自然边坡和开挖边坡）的不稳定岩体容易坍塌，也由于泄洪水流雾化的不断作用，降低了岩体的稳定性，水流挟带砂石沿程磨损，造成新的空化源，因此需对边坡做必要的支护，如混凝土挡墙、锚喷支护、预应力锚索等措施。

下游河道冲刷与岸坡失稳的碎石容易被回流、环流卷进护坦或消力池，在漩滚水流的驱动下强烈磨损混凝土表面，如黄坛口、石泉、龚嘴等工程。从防止下游泥沙、碎石卷进消力池的角度考虑，尾坎下游坡宜陡不宜缓。

国内外均有些研究报告寻求能自清理泥沙的消力池型式，使进入池中的碎石、泥沙能自行排出，由此尾坎内坡宜缓不宜陡。也有的报告提出定期泄放某一流量的流量，冲走池内泥沙，其泄流量需通过模型试验或原型试验确定。这些方法还没有成熟的工程经验，只能供设计师们参考。

5.2.6 推移质以跳跃、滚动和滑动方式通过泄水建筑物，对混凝土表面产生撞击与磨损作用，建筑物底坡不得变化过多，不得设置跌坎和消力池，以免加剧推移质的撞击与磨损。渔子溪一级泄洪闸吸取了石棉二级电站冲沙闸严重破坏的教训，从上游铺盖到下游护坦的底坡连接平顺，做成 1:22 的斜坡，采用急流泄槽型式使远驱式水跃发生在远离护坦的下游河床，护坦末端设 7.5m 深的混凝土防冲齿墙。自 1972 年运行以来，护坦混凝土有深 5cm~6cm 的磨损，满足安全运行要求。这为本条规定提供了依据。

5.2.7 根据颗粒磨损能量理论，试验研究表明，悬移质和推移质

水流对于混凝土类脆性材料的冲磨，磨损与冲角关系曲线是单调上升的，当冲角小于 10° 时，磨损甚微。

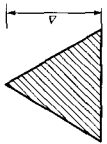
5.2.8 泄水建筑物抗冲磨混凝土抵抗推移质和悬移质的磨损破坏，需要适当加厚钢筋保护层厚度，如厚度偏小，当磨蚀深度超过其厚度时钢筋裸露，会加剧冲磨破坏。根据我国工程实践，葛洲坝二江闸为 25cm，太平湾消力池为 20cm。但同时也考虑到厚度过大增加了工程量，各工程水流的含沙量不同，随着泄水建筑物形体设计不断优化，磨损量会减小；泄水建筑物泄洪历时短，又有维修时间，故规定底板钢筋保护层厚度不得小于 10cm，各工程可根据具体情况选用。本条规定表层钢筋应平行于水流方向布置，以使磨蚀深度到达钢筋时对水流阻力最小，减轻磨蚀破坏的恶化程度。

5.2.9 本条规定是根据便于施工的要求制定的。

5.2.10 泄水建筑物冲磨破坏的实例调查表明，含推移质水流在流速 $7\text{m/s} \sim 10\text{m/s}$ 冲刷下，在不同运行历时混凝土产生不同程度的磨损：悬移质泥沙含量大于 20kg/m^3 ，水流速度大于 20m/s 时，经过比较长时段运行，造成混凝土严重的磨损；过流速度 15m/s 以下，平均悬移质泥沙含量 40kg/m^3 左右，经过长时间的运行，对 C20 混凝土的磨损轻微，无需采取特殊的抗磨措施。本条规定的含沙量系指汛期水流平均含沙量。

5.3.1 高速水流泄水建筑物的空蚀现象比较复杂，由于过水边界的突变、突体、陡坎，使水流发生涡流和分离时，流速加大，压力降低。当压力降到相应水温的汽化压力时，流体中形成空腔（穴）或气泡，这称为“空化”。空穴气泡不断随水流运动而突然溃灭，在很短的瞬间以极大的压力冲击微小的混凝土表面，造成破坏，即为“空蚀”。所以，要防止混凝土产生空蚀，就要使水流不发生空化。设计泄水建筑物时，进行布置优化和形体优化，使沿程水流保持高时均压力 and 低流速，提高水流空化数 σ ，降低初生空化数 σ_c 。当 $\sigma \leq \sigma_c$ 时，混凝土表面易发生空蚀，见表 4。

表 4 原型突体初始空蚀资料

工程名称	实际过水时							
	落差 $H(\text{m})$	流速 $v(\text{m/s})$	$\Delta(\text{mm})$	σ	α	ΔH	σ	α
刘家峡右岸泄洪洞	116.5	40	4	0.15	1.60	1:25 ($\Delta=10\text{mm}$)	0.15	0.13
碧口右岸泄洪洞	89.5	30	8~10	0.30	2.01 2.16	1:10	0.30	0.30 (大面 积破坏, 坑 深 1cm)
丰满溢流坝	71.1	30	3	0.74 (在鼻坎上)	1.48	1:6 1:10 ($\Delta=10\text{mm}$)	0.46 0.36	0.52 0.32
柘溪溢流坝	58.7	24.6	40~70	0.39	3.39	—	—	—

注: 初始空蚀以混凝土表面出现小麻点为准。

鉴于设计人员需要掌握泄水建筑物的初生空化数 σ_1 以初定体形,附录B列出有关结构的 σ_1 值,供可行性研究阶段选用。而技施阶段的I、II级和III级不易检修的高流速泄水建筑物,通过水工模型试验已确定体形,应以此体形进行减压箱试验测定 σ_1 ,以选取防空蚀措施或修改设计。

按空化发展程度,可分为空化开始阶段 $0.7 < \sigma/\sigma_1 < 1.0$;空化发展阶段 $0.15 < \sigma/\sigma_1 \leq 0.7$, $\sigma/\sigma_1 = 0.675$ 是最危险的;超空化阶段 $\sigma/\sigma_1 \leq 0.15$ 。空蚀的强度,取决于空化的型式及其阶段、真空区的类型、绕流体的体形和泄水建筑物表面的斜率、水中的空气含量、衬砌材料的特性等。在空化开始阶段和超空化阶段,空蚀很小,甚至不空蚀。只有在空蚀发展阶段内, σ/σ_1 达某一数值时,产生较强的空蚀。根据前苏联的试验成果,取 $\sigma/\sigma_1 = 0.85$ 为空蚀开始是可行的。鉴于放空洞使用次数少,有足够的检修时间,临时性泄水建筑物短时间使用后即废弃,可采用 $\sigma \geq 0.85\sigma_1$ 设计。但导流洞和导流底孔的门槽部位,如果空蚀严重,将影响后期封堵,危及水库蓄水,需优化门槽体形使 $\sigma \geq \sigma_1$,避免发生空蚀。

5.3.2 水流空化数 σ 的计算式(5.3.2)是从事水工专业设计人员所掌握的,但各单位均不大重视沿程 σ 的计算,仅依靠水工模型试验调整体形,靠工程类比选用防空蚀材料,造成不必要的浪费,增加了施工难度,也有不少工程发生严重的空蚀破坏。本条明确规定应进行水流空化数 σ 计算,比较 σ 与 σ_1 ,采取相应防空蚀措施,是科学合理的。

5.3.3 国内外大量泄水工程实践表明,平面闸门的门槽、溢流堰面、水流转弯段、水流突变处、反弧段附近、鼻坎、分流墩、消力墩等部位由于设计体形不佳或施工不平整度控制不能满足设计要求而发生空蚀破坏,占破坏总数的32.8%。重视这些部位的体形设计优化,严格控制施工质量,对防止空蚀破坏是非常必要的。

对有条件进行水工模型试验的工程,以水流空化数 $\sigma = 0.30$ 作为设计和施工的控制条件是比较科学的。

5.3.4 本条明确规定以水流空化数确定过流表面不平整度的处理标准,以水头和流速的大小来控制不尽合理,因为空蚀和水头或流速有直接关系,但也和体形有关。尽管流速大,如果体形合理,时均压力大,也不一定会发生空蚀。

表 5.3.4 系参照美国垦务局对 5 个同一混凝土材料建成的流速范围 32m/s~42m/s 的泄洪洞进行的调查和总结提出的处理标准,并结合 DL/T 5166、DL/T 5195、DL/T 5144 的有关条款提出的,反映了国内外的建设水平。

5.3.5 水流掺气是泄水建筑物混凝土表面减免空蚀的重要措施,1960 年美国首先在大古力坝泄水孔应用通气槽取得成功。我国 20 世纪 70 年代初开始该项技术的研究,并不断应用于工程实践,详见表 5。

表 5 国内泄水建筑物采用通气减蚀设施的实例

序号	泄水建筑物名称		最大流速 m/s	通气设施型式	建成年份	实际效果	备 注
1	冯家山溢洪洞		29.6	上是坎槽组合式,下是跌坎	1978	无空蚀	国内首次采用底部通气
2	石头河泄洪洞		40.6	在反弧前后均设坎槽组合式	1981	运行 2000h 以上无空蚀	1981 年 7 月起泄洪运行
3	乌江渡	溢流坝	42.0	坎槽组合式通气槽	1982	除 3.6cm 垂直升坎后有空蚀外,其他运行 126h 无空蚀	1982 年及其后多次进行过原型试验
		左岸泄洪洞	43.1	斜坡段末端设一道坎槽		除高于 2.1cm 垂直升坎后有空蚀外,其他无空蚀	—
4	毛家村泄洪洞		34.4	两道坎槽组合式	1983	—	处理时增设通气槽
5	东江二级放空洞		38.6	门后设一道突扩突跌通气	1986	运行 10272h 无空蚀	国内首次采用突扩突跌式

表 5 (续)

序号	泄水建筑物名称		最大流速 m/s	通气设施型式	建成年份	实际效果	备 注
6	龙羊峡	中孔	40.0	三道挑坎与跌坎组合式	1986	—	—
		底孔	> 40.0	一道突跌三道坎槽组合式		运行 1583h, 底板与侧墙均有破坏	表面不平整是主要原因
7	鲁布格	左岸溢洪道	35.0	两道坎槽组合式	1990	1991 年过水 2h 有局部麻面	—
		右岸泄洪洞	34.0	两道掺气坎		—	—
8	白山溢流坝		44.0	一道通气跌坎	—	运行状况良好	1986 年过水, 做原型观测
9	株树桥溢洪道		32.0	两道掺气坎	—	运行状况良好	—
10	六都寨溢洪道		33.0	三道掺气坎	—	运行状况良好	—

国内目前是根据流速的大小来决定是否采取掺气措施的, 当流速大于 30m/s, 视时均压力大小决定是否采取掺气措施; 当流速大于 35m/s, 就必须掺气。本条规定以水流空化数小于 0.30 (相当于流速大于 30m/s) 时设置掺气减蚀设施, 系参考了美国垦务局 20 世纪 90 年代初提出的要求和我国工程实践的成功经验。

关于含沙水流的掺气效果问题, 河海大学通过小浪底水利枢纽明流泄洪洞的浑水模型试验研究表明, 对泄洪排沙建筑物采用挑坎等掺气设施, 可以实现有效掺气, 且有类似于清水的掺气特性, 近边壁水流如具有一定的掺气浓度, 可有助于混凝土表面的抗磨蚀。试验也表明, 含沙水流对混凝土表面的磨蚀率, 随流速、含沙浓度及浑水密度的加大而加大, 随材料强度和掺气浓度加大而减小, 磨蚀率大致与掺气浓度的立方根成反比。

设置掺气的原则与 DL/T 5166 基本一致。对组合掺气型式要

求进行大比尺 ($>1:50$) 模型试验论证, 因为设计体形不合理, 会导致更严重的空蚀破坏。对掺气浓度要求大于 3%, 系根据有关工程经验提出, 并应注意掺气坎内的排水, 保证有效掺气。掺气保护长度决定于掺气结构体形和掺气浓度, 只要体形合理, 掺气浓度大于 3% 时, 其保护长度为: 曲线段 70m~100m, 直线段 100m~150m。

掺气型式的模型试验主要是测试空腔 (大小、长度、形状), 水翅形状, 掺气效果 (浓度、通畅性), 风速等。由于受模型缩尺的影响, 水流含气量的测定还缺乏可靠的方法, 也难以引伸到原型。

工程实践表明, 泄流底板的掺气水流含气量大于 3% 容易做到, 但侧壁的掺气方式及其效果尚需进一步研究。

对于容易形成封闭的低压区域, 如突扩、消力墩后需设计补气或补水装置。

5.3.6 鉴于流速大于 30m/s 的工程部位易发生空蚀破坏, 需要进行原型监测, 施工质量应予以保证, 并应进行混凝土抗空蚀强度试验, 选用高等级抗空蚀强度混凝土是非常必要的。

6 材 料

6.1.1 高性能混凝土是在 20 世纪 80、90 年代初才出现的, 不同国家、不同学者依照各自的认识、实践、应用范围和目的要求的差异, 对高性能混凝土有不同的定义和解释。我国已故工程院院士吴中伟在 1999 年出版的著作《高性能混凝土》中定义如下: 高性能混凝土是一种新型高技术混凝土, 是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土, 它以耐久性作为设计的主要指标。针对不同用途, 高性能混凝土对耐久性、工作性、适用性、强度、体积稳定性和经济性等性能需有重点予以保证。为此, 高性能混凝土在配制上的特点是低水胶比, 选用优质原材料, 并除水泥、水、集料外, 必须掺加足够数量的矿物细掺料和高效减水剂。

国外设计寿命 100 年~120 年的高性能混凝土的工程实例和配合比见表 6。

对于水工抗磨蚀混凝土而言, 除按本标准表 6.3.2 选择强度等级外, 都必须配制成具有较高抗磨蚀性能的高性能混凝土。我国已在部分工程中成功应用的抗磨蚀高性能混凝土与胶凝材料用量相近的普通混凝土对比见表 7。

6.1.2 本条说明如下:

1 在混凝土及砂浆中, 骨料的抗冲磨性能比水泥石高得多, 故要求用高强度等级水泥, 以减少水泥用量。

2~3 当砂子细度模数从 2.31 降至 1.26 时, 混凝土抗冲磨强度将显著降低, 故应使用中粗砂。几种不同岩石类粗骨料拌制的混凝土相对抗冲磨强度为: 石灰岩 1.00; 花岗岩 1.73; 黑云母石英闪长岩 2.33; 辉绿岩铸石 3.04。故规定应选用质地坚硬的骨料。

表6 境外近年耐久使用寿命100年~120年高性能硅粉混凝土工程实例

工程	对混凝土要求			混凝土配合比	
	种类	低碱、抗硫酸盐、硅酸盐水泥	最大水灰比	0.35 (配比 A)	0.45 (配比 B)
水泥	28d 强度	> 50MPa			
	水化热	< 320kJ/kg	最小水泥用量	300kg/m ³	
粉煤灰	细度 (> 0.045mm)	< 25%	最小粉煤灰掺量	胶凝材料的 15%	
	烧失量	< 4%	最小硅粉掺量	胶凝材料的 4%	
硅粉	细度 (> 0.045mm)	< 10%	最大硅粉掺量	胶凝材料的 8%	
	烧失量	< 2%	粉煤灰+硅粉	< 胶凝材料的 25%	
粗骨料 (砾石)	有层理颗粒含量	< 5%	最大加水量	135kg/m ³ (配比 A)	140kg/m ³ (配比 B)
	吸水率	< 1%	最大含气量	浆体体积的 20%	
砂	立方颗粒含量	> 70%	最小含气量	浆体体积的 8%	
	碱活性成分含量	< 1% 体积	最大引气量	浆体体积的 7%	
	20 周碱膨胀量	< 0.5×10^{-6} (配比 A)	气泡最小比表面积	25mm ² /mm ³	
	云母含量	< 1×10^{-6} (配比 B)	最大氯离子含量	胶凝材料的 0.1%	
		< 1%	最大含碱量	3kg/m ³	

丹麦大
贝尔特
海峡工
程(1997
年建成)

表 6 (续)

工程	对混凝土要求		混凝土配合比	
	水泥种类			
香港青 马大桥	普通水泥	25%~35%粉煤灰	普硅水泥	135kg/m ³
	普通水泥	65%~75%矿渣	磨细矿渣	290kg/m ³
	水泥用量	>350kg/m ³ <550kg/m ³	硅粉	25kg/m ³
	水胶比	<0.4	20mm 单尺寸骨料	670kg/m ³
	28d 强度	>50MPa	10mm 单尺寸骨料	310kg/m ³
	氯离子含量	<胶凝材料的 0.06%	专门破碎细骨料	710kg/m ³
	最大含碱量 (当量 Na ₂ O)	3kg/m ³	总加水量	175kg/m ³
			高效减水剂	5.8kg/m ³
			缓凝剂	0.3%~0.6%
	水泥种类	硅粉 (含 7.5% 硅粉)	水泥	430kg/m ³ (含 32kg/m ³ 硅粉)
加拿大 联盟大 桥(1997 年建成)	胶凝材料用量	>450kg/m ³	粉煤灰	45kg/m ³
	粉煤灰	<10%	砂	704kg/m ³
	水胶比	<0.34	石	1029kg/m ³
	91d 强度	60MPa	水	145kg/m ³
	氯离子渗透性	<1000c	减水剂	液体 1742g/m ³
	含气量	5%~8%	高效减水剂	液体 3076g/m ³
	坍落度	(180±40) mm	引气剂	按要求加入

表 6 (续)

工程	对混凝土要求		混凝土配合比	
			水泥用量	$> 325\text{kg/m}^3$
丹麦— 瑞典厄 勒海峡 工程	水泥	低碱, $C_3A < 5\%$	硅粉掺量	$<$ 胶凝材料的 5% (实际 掺量即为 5%)
	硅粉	符合标准 ENVI97-1 中 4.7 的要求	水胶比	< 0.40 (A 种混凝土, 浪 溅区以上) < 0.45 (B 种混凝土, 浪 溅区以下)
	粉煤灰	不得用于结构混凝土 (担心含气量难控制)	胶凝材料	$> 340\text{kg/m}^3$
	水	达到饮用水质量, $\text{Cl}^- < 600\text{mg/L}$	氯离子含量	$<$ 胶凝材料的 0.1%
	骨料	干净, 通过碱活性测试	含碱量 (当量 Na_2O)	$< 3\text{kg/m}^3$ (砂浆体积为 60% 的混凝土)
	外加剂	使用减水剂/高效减水剂, 暴露于冻融环境混凝土使用引气剂		

表7 高性能抗腐蚀混凝土与普通混凝土性能对比

工程名称	水泥用量 kg/m ³	粉煤灰 用量 %	硅粉剂 用量 %	磨细矿 渣用量 %	28d 抗压 强度 MPa	抗冲磨 相对倍 数	28d 收 缩率 ×10 ⁻⁶
水口工程船闸 突扩段	217	15	0	0	22.5	1.0	170
	255	15	24	0	57.7	2.1	198
珊溪工程溢洪 道钢纤维混凝土	460	0	0	0	30.2	1.0	431
	393	15	21	0	65.8	1.8	312
飞来峡工程溢 流面上下闸首及 廊道	400	0	0	0	46.2	1.0	—
	350	0	15	0	64.8	1.6	—
三峡工程临时 船闸上游墩墙门 槽	446	0	0	0	41.7	1.0	—
	329	15	21	0	63.6	2.6	—
混凝土耐久性 研究天津港示范 工程	419	0	0	0	43.9	1.0	217
	356	15	8.5	5.5	76.8	1.9	239
	331	16	9.0	5.3	72.6	1.9	230
注1：硅粉剂包括硅粉、补偿收缩材料 and 外加剂。 注2：冲磨试验方法为水下钢球法。 注3：珊溪和三峡工程掺硅粉剂的均为硅粉钢纤维混凝土。							

骨料中如含有软弱颗粒或粗骨料颗粒粒径较大，会使混凝土在高速挟沙水流冲磨作用下表面凹凸不平，从而加剧冲磨破坏作用及发生空蚀破坏的可能性，故提出本条规定。

4 高效减水剂已成为混凝土的第五组分，尤其对于抗冲磨防空蚀的混凝土，掺用高效减水剂可显著减少用水量，改善和易性，能有效提高各类混凝土的抗磨蚀能力，故应掺用。

5 20 世纪 90 年代以来为了配制高性能混凝土，世界各国都大力开展掺用活性掺合料的研究。试验结果证明，以往将矿渣与水泥熟料共同细磨，由于二者硬度不同，使其活性没有得到充分应用。经研究，磨细矿渣粉不但可以代替水泥，降低水化热温升，

而且可以提高抗渗性、抗化学腐蚀性等耐久性，故将磨细矿渣粉作为活性掺合料之一。在推荐使用的各种活性掺合料中，由于硅粉可明显提高抗磨蚀性，故优先采用硅粉。

6.2.1~6.2.2 经国内有关工程实践，所列各类树脂砂浆与基底有较好的黏结强度，且其抗冲磨防空蚀强度高于无机材料。但树脂砂浆如未经减少收缩降低弹模处理，其固化过程产生的收缩较大，最大可达 5000×10^{-6} ，且发生 100°C 以上放热峰，如果大面积施工会在黏结面产生较大剪切应力。如果基底混凝土强度低于 C30，则易产生剪切破坏，故树脂砂浆一般只适用于小面积使用。如果具有与混凝土线膨胀系数相近又有弹性的树脂砂浆，经工程实践验证，可以在较大面积范围使用。

树脂砂浆的骨料与填料的品种对其抗冲磨性能的影响见表 8，故强调使用耐磨骨料及填料。

表 8 不同骨料对树脂砂浆抗冲磨和力学性能的影响

树脂砂浆类别	砂料	粉料	骨料/树脂	冲磨失重率 %	冲击韧性 $\text{N} \cdot \text{m}/\text{cm}^3$	抗压强度 MPa	抗拉强度 MPa
AE-3200	硬练标准砂	铸石粉	6.0	0.89	4.5	99.9	17.3
	河砂		6.5	1.75	2.9	89.9	16.3
	金刚砂		6.5	0.82	3.3	100.7	20.5
	棕刚玉砂		7.0	0.59	5.9	116.1	20.1
EP-6101	硬练标准砂	铸石粉	4.5	1.08	11.3	93.0	19.0
	河砂			0.75	11.5	112.2	22.9
	棕刚玉砂			0.70	27.0	102.9	—

6.3.1 根据实际工程调查，我国遭受磨蚀破坏的大中型水工泄水建筑物，其中绝大部分使用 C40 以下混凝土，即使使用 C40 混凝土的葛洲坝二江泄水闸也同样存在较严重的磨蚀破坏。

原苏联学者高连宾在所著《水工建筑物护面的耐磨性》一书中对不同材料许可的不冲刷流速见表 9。

表 9 不同材料镶面护层的许可不冲刷流速及厚度

镶面护层材料种类	许可的不冲刷流速 m/s	极限许可含沙量 %	泥沙的极限粒径 mm	护层厚度 cm
钢板或铸铁板	不受限制	不受限制	不受限制	1~2.5
铸 石	不受限制	不受限制	不受限制	—
花岗岩或其他坚硬岩石	30~50	10~15	≤250	30~50
钢屑混凝土	15~20	≤5	50~100	10~15
C60 耐磨混凝土	12~15	≤3	50~100	40~60
C50 耐磨混凝土	10~12	≤3	50~100	40~60
C40 耐磨混凝土	6~10	≤3	50~100	40~60
C30 耐磨混凝土	4~6	≤3	50~100	20~25
坚硬木材	8~10	≤2	50	20~25
环氧树脂混凝土	10~15	≤2	50	5~10

由表 9 可见, C40 耐磨混凝土的不冲刷流速小于 10m/s, C30 耐磨混凝土不冲刷流速仅 4m/s~6m/s。经综合考虑, 提出用作抗磨蚀的各类混凝土及砂浆的强度等级应大于等于 C35。

6.3.2 推移质及悬移质的磨损, 可概括为不同冲角作用于材料表面的流体力学磨粒磨损, 按照 J.G.Bitter 于 1962 年建立的磨粒磨损能量理论: 沙速与磨损失重率呈二次方关系, 但有一个临界流速, 如沙速小于临界流速则磨损很小。原水电部十一局根据三门峡工程原型观测资料, 并参照试验研究成果, 认为悬移质泥沙对混凝土磨损量与作用流速 v 呈 2.7~3.0 次方关系。与含沙量 C 的 0.7~1.0 次方成正比。据三门峡工程 1967 年及 1969 年先后投入

运行的排沙洞运行观测表明,两洞实际运行断面最大平均流速 $v_1=10.4\text{m/s}$, $v_2=10.9\text{m/s}$,至1980年汛后已分别运行了81213h和43331h。压力段混凝土表面除底部细骨料裸露外,侧、顶面磨损轻微,而当隧洞明流段最大流速增大至 $18\text{m/s}\sim 20\text{m/s}$ 时,磨损量增大3倍~4倍,流速达到 20m/s 时,20mm厚的钢板历时2540h即告磨穿。又考虑到水流的空蚀能力与水流流速的4~10次方成正比,故决定按流速和水流空化数大小对抗磨蚀材料选择提出不同要求。

在原材料相同的情况下,混凝土的抗磨蚀性能与其抗压强度成正比,成都勘测设计研究院对不同强度硅粉混凝土进行的研究表明:硅粉混凝土抗压强度从 56.4MPa 提高到 73.6MPa 时,抗冲磨强度可从 $1.061\text{h}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ 提高到 $1.586\text{h}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$,故应区分不同流速、不同含沙量,采用不同强度等级的混凝土。

划分流速主要参照 DL/T 5166 规定,以大于 20m/s 为有发生空蚀的可能性;而 DL/T 5108《混凝土重力坝设计规范》规定大于 25m/s 应注意发生空蚀的可能性。故将流速上限定为大于 35m/s ,下限定为 15m/s ,中值取 25m/s 。

含沙量与磨损量成 $0.7\sim 1.0$ 次方关系,但目前积累资料还不够,暂定小于等于 2kg/m^3 和大于 2kg/m^3 两级。该含沙量为多年平均含沙量。

至于强度等级的划分,根据近20年来对磨蚀破坏的修补和工程设计已采用情况,采用 C50 以上的硅粉混凝土和硅粉砂浆有较显著的效果。例如刘家峡工程泄水道、葛洲坝电厂二江泄水闸、大伙房水库消能塘、三门峡工程底孔和潘家口工程反弧段、映秀湾水电站拦河闸底板等工程修补,范厝、东风、水口、五强溪、飞来峡、二滩、小浪底、珊溪等新建工程也已使用高强硅粉混凝土作为抗冲磨材料;美国也已在泄水建筑物多项修补工程中使用抗压强度达 $50\text{MPa}\sim 90\text{MPa}$ 的硅粉混凝土。

根据南京水利科学研究院试验结果,当流速到 $30\text{m/s}\sim 50\text{m/s}$

时要采用花岗岩和其他坚硬岩石；根据长江科学院试验结果，花岗岩抗冲磨能力比 C50 普通混凝土提高约一倍；而据表 7，C60~C70 高强硅粉混凝土的抗冲磨能力比普通 C40 混凝土提高约一倍左右，故决定流速大于 35m/s 且多年平均含沙量大于 2kg/m^3 时，强度等级取大于等于 C60。根据美国 ACI 规范，当流速大于 20m/s 时，水工泄水建筑物混凝土设计强度要大于等于 42MPa，故决定流速在 15m/s~25m/s 时，强度等级最高取 C40~C50；流速在 25m/s~35m/s 时，考虑到冲磨空蚀联合作用，破坏加剧，混凝土强度比流速为 15m/s~25m/s 的提高两级（一级为 5MPa）。

6.3.3 当今混凝土材料的发展趋势是从低强度到高强度，从高强度到高性能，高性能混凝土的特点是除高强度外，还需要有好的体积稳定性和施工性。因此，不能只单纯依靠增加水泥用量来提高强度，而要使用高效减水剂降低水灰比和使用活性细粉料（硅粉、优质粉煤灰、磨细矿渣粉等）部分取代水泥。有关使用高效减水剂和硅粉配制水工高性能抗磨蚀混凝土，国内已有获水利部、能源部科技进步奖的成果，技术比较成熟，且已在工程使用十几年，故本标准作此规定。

铁矿石和铸石骨料具有比一般岩石骨料更好的耐磨性，硅粉铁矿石砂浆或混凝土及硅粉铸石砂浆或混凝土具有比硅粉普通骨料混凝土更好的耐磨性，但其价格昂贵，可在特别重要的工程上应用。

硅粉钢纤维混凝土具有比不掺钢纤维硅粉混凝土更好的抗剪、抗拉、抗折强度和抗冲击性能，有更好的抗裂性，适用于有特殊要求的工程。三峡工程临时船闸 1 号、3 号坝段上游墩墙门槽混凝土，为满足轴拉强度大于 5.0MPa、抗剪强度大于 13.0MPa 的要求，采用硅粉钢纤维混凝土。珊溪水利枢纽泄洪洞也采用硅粉钢纤维混凝土，均获得成功。

几种特种混凝土性能对比见表 10。

表 10 几种特种混凝土性能对比 (南京水利科学研究院试验资料)

编号	胶凝材料用量 kg/m ³		外加剂	水胶比	坍落度 cm	28d 强度 MPa		冲磨 失重率 %	冲击 韧性 kN·m
	水泥	活性 掺合料				抗压	劈裂 抗拉		
南 1	446	0	—	0.40	12.8	41.7	3.3	5.1	4.8
南 2	341	三掺 122	N-2	0.25	11.6	67.4	5.2	3.6	35.2
南 3	336	三掺 120	N-2	0.32	13.7	63.6		2.4	101.6
南 4	434	硅粉 38	FDN+ 木钙	0.33	4.0	89.6		2.1	64.9

注 1: 南 1~南 4 分别为 C40 普通混凝土、高性能硅粉混凝土、高性能硅粉钢纤维混凝土、高性能硅粉铁矿石混凝土。

注 2: 冲磨试验方法为水下钢球冲磨法 (仿 ASTM C1138-89 方法)。

6.3.4 采用 C50 以上硅粉铁矿石骨料混凝土, 硅粉铸石砂石骨料混凝土, 硅粉钢纤维混凝土, 或采用高强抗磨蚀混凝土嵌固钢轨、钢板、质地坚硬的卵石或条石等。推移质砂石是在河床表面附近以滑动、滚动、跳跃或层移方式运动的颗粒。大量工程实践表明, 这类砂、石颗粒对建筑物磨损破坏严重, 且粒径越大, 破坏越严重, 应认真对待, 经工程实践 (如渔子溪、映秀湾、三屯河、都江堰、石棉等水电站) 多采用各类特种抗磨蚀材料。高性能铁矿石骨料混凝土的主要性能见表 11。

表 11 高性能铁矿石骨料混凝土的主要性能

混凝土种类 \ 试验单位	南京水利科学研究院			成都勘测设计研究院			武汉大学	
	抗压 强度 MPa	冲击 韧性 kN·m	冲磨 失重率 %	抗压 强度 MPa	冲击 韧性 N·m/cm ³	磨损率 kg/hm ²	抗压 强度 MPa	平均稳 定冲磨 失重率 %
普通混凝土	41.7	4.8	5.1	68.2	21.2	0.758	37.2	1.366
高性能普通骨料混凝土	67.4	35.2	3.6	73.6	87.4	1.586	59.3	0.712
高性能铁矿石骨料混凝土	89.6	64.9	2.1	63.6	148.8	1.391	84.4	0.466

由表 11 可知,铁矿砂石混凝土的冲击韧性及抗冲磨性能均优于普通砂石混凝土,故虽然其造价较高强硅粉混凝土高,仍可作为推移质作用部位优先选用材料。在条件不许可时,也可采用高强硅粉钢纤维混凝土。

三门峡工程曾使用钢板作为抗悬移质磨损镶护材料。但实践证明,当平均流速为 $19.3\text{m/s} \sim 25.9\text{m/s}$ 时,经 20d 和 106d 排沙运行后,普遍发生严重磨损,最大磨损深度达 25mm,故钢板不是抵抗悬移质磨损的理想材料。但在以推移质作用为主的石棉水电站,经过多次较大型的现场试验,证明钢板、钢轨和铸石板抗磨损能力最强,目前已全部改铺钢板、钢轨(缝间嵌混凝土或铸石砖)。

6.3.5 实践表明,与基底混凝土线膨胀系数相差 4 倍~5 倍的有机材料,抗冲磨防空蚀性能虽好,但由于与基底温度适应性不好,用于室外环境或温度变化大的室内环境时,1 年~2 年即会出现开裂脱落。

乙二胺、二甲苯造成工人中毒已有实例,随着科学技术的发展,用于配制有机材料的固化剂,除过去常用毒性较大的乙二胺外,已有毒性相对较低的聚酰胺、苯二甲胺等固化剂。稀释剂除二甲苯外,也有环氧丙烷丁基醚等品种可供选择。

7 施 工

7.1.1 DL/T 5144 对混凝土配制强度要求已修改,但鉴于抗磨蚀混凝土的重要性,故参考 JGJ 55《普通混凝土配合比设计规程》,全部按 90% 保证率取值。由于 DL/T 5144 对强度大于等于 C50 的混凝土标准差 σ 值均取 5.5 不够合理,故参照 CECS104《高强混凝土结构技术规程》取值。

7.1.4 混凝土的干缩率随水泥、骨料、掺合料品种及用量、水灰比因素而变化,掺用硅粉的混凝土一般早期干缩偏大,60d 后即接近不掺硅粉的混凝土,复合采用硫铝酸盐 (UEA) 膨胀剂有较好的补偿收缩效果,见表 12。

表 12 掺与不掺 UEA 膨胀剂的混凝土干缩率对比

水泥用量 kg/m ³	硅粉剂	UEA	干 缩 率 ×10 ⁻⁶						相对抗冲 磨能力
			2d	7d	14d	28d	60d	90d	
244	无	无	14	41	116	170	257	281	1.0
255	有	无	101	141	208	262	323	333	2.1
255	有	有	49	91	157	198	248	285	2.1

7.1.5~7.1.6 试验证明,粗骨料是混凝土中抗冲磨性能最优良的组成部分。因此,抗磨蚀混凝土配合比设计中,应尽量采用较小的混凝土坍落度,尽可能多地加入密实的粗骨料,尽可能减少较弱的水泥浆用量。对于闸底板、护坦底板等平面浇筑的抗磨层,施工浇筑、振捣相对容易,建议取比 DL/T 5144 更低一级的坍落度。

7.2.2 综合国内外情况,当抗磨蚀混凝土与普通混凝土能够正常连续施工时,抗磨层厚度只需 20cm。又考虑到各类抗磨蚀混凝土的强度与基底混凝土相差较大,故规定应安排在同一层内浇筑且同时振捣,使强度等级不同的混凝土交界面形成一个结合良好的

过渡层。如果不能同时施工，则应按施工缝处理，从便于施工考虑，此时抗磨层厚度宜增大至 30cm~50cm。

7.2.3 拌制抗磨蚀混凝土投料顺序可参照 CECS104《高强混凝土结构技术规程》，如图 1 所示。

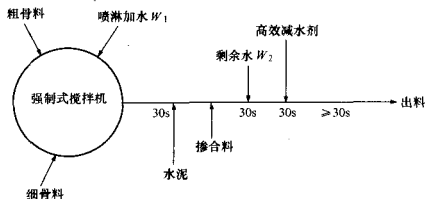


图 1 投料顺序示意图

7.2.6 混凝土浇筑过程中由于自身的流动性和振捣引起的压力，以及其他各种荷载对模板的作用，模板必须具有足够的强度和刚度。在安装、浇筑、拆除的过程中，模板都有不同程度的损坏和变形，其结构设计需要随时修正，混凝土浇筑速度也需及时调整，才能保证泄水建筑物体形满足设计要求。

表 7.2.6 列出各种水流空化数对木模和钢模的使用要求，这和水工设计标准一致，也参考了美国垦务局关于模板的技术标准。对低水流空化数的扭曲部位采用易于弯曲的纤维板或薄胶合板制作模板，以保证泄水建筑物体形满足设计要求。采用该类材料将提高模板费用，工程概算中应予以计及。对不易变形的模板或木模板浇筑的过水壁面，将形成多条折线，模板拼接也难以满足表 5.3.4 规定的控制标准，在低水流空化数的扭曲部位不应使用。

7.2.7 抗磨蚀混凝土单位水泥用量较高，水化热大，且含硅粉的混凝土其自身体积变形均呈收缩型，早期保湿不良，容易产生表面裂缝。延长木模的拆除时间，有利于抗磨蚀混凝土的保温保湿，并能防止结构的施工期变形。

混凝土终凝前的收缩称为塑性收缩，由于各类高性能抗磨蚀混凝土水灰比低，泌水率很小，表面水分蒸发后得不到泌水补充，易产生塑性收缩开裂。美国 ACI 有关炎热季节混凝土施工的报告认为：普通混凝土表面水分蒸发速度接近 $1\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时，容易产生塑性开裂；而高强硅粉混凝土表面水分蒸发速度接近 $0.5\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时，就有可能产生塑性开裂。故本标准规定应及时覆盖保湿，防止出现塑性开裂。混凝土表面水分蒸发速度与气温、混凝土温度、风速及环境相对湿度的关系可参照 ACI 提出的图表估算（见图 2）。

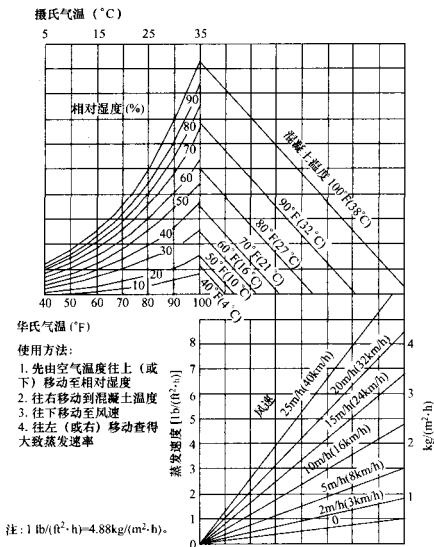


图 2 混凝土和空气温度、相对湿度、风速对混凝土表面蒸发速度的影响

8 维护与修补

8.1.1 混凝土遭受的磨蚀破坏与建筑物运行工况密切相关，本条规定对于及时发现问题，制定工作对策非常必要。

8.1.2 任何结构修补工作开展之前都应事先对破坏现象及其产生的原因有清楚的了解与判断，才能提出切合实际的修补方案。此外，抗磨蚀混凝土护面一旦局部发生破坏，由于水流条件恶化，破坏范围与程度将明显加剧。因此，及早地修补可避免日后代价昂贵的大修甚至重建。重要工程修补的成败对工程的技术、经济与社会效益具有显著影响。进行修补设计，可使修补工作更加科学、合理、经济，使材料选择与施工工艺有据可依，从而确保修补成功。大规模施工前进行现场工艺试验是很必要的，尤其当采用新材料与新工艺时，通过现场试验总结经验，可使正式修补施工一次成功，避免可能造成的较大损失。

8.1.3 可选择的修补材料较多，工艺也不尽相同，本条规定为此提出有关原则意见是必要的。

8.2.3 美国陆军工程兵团对宾夕法尼亚州 Kinzua 坝消力池的冲磨破坏调查结果表明，在高速漩流作用下消力池内的推移质运动是造成消力池磨损破坏的主要因素。进行该款规定的检查可借以判断沉积物的来源及其在池内的运动规律以及评估磨损的轻重程度。

8.2.6 泄水建筑物的水力学和水工设计对于减免混凝土的磨蚀破坏至关重要。当结构体形设计、消能工设计与布置欠合理时，可能陷入破坏—修补—破坏的恶性循环。我国柘溪工程溢流坝的挑流鼻坎、盐锅峡工程消力池中的消能墩以及陆水工程消能趾墩后的护坦等反复遭受空蚀破坏即为典型实例。经改进体形设计与消能工布置后，空蚀破坏问题才得到解决。护面材料抗磨蚀性能

差、施工不平整度不满足设计要求、不同护面材料间的接缝欠合理，运行方式不恰当等，都是造成短期内重复破坏的主要因素，应予以关注。

8.3.2 研究与实践证明，任何修补工程的寿命，都与修补物一原基底间的黏结强度及其两种材料间的温度变形适应性密切相关。如果修补材料的弹性模量和线膨胀系数与基底材料的相差过大，则因变形不协调使结合面承受剪应力，长期反复地非协调变形将导致结合面破坏，使修补材料脱壳和剥落。

8.3.4 修补区的边缘和槽、孔形状按本条规定处理后，可加强修补区的整体性和牢固性。避免由于残留浅薄边口的破坏而加剧修补区的整体破坏。

8.3.5 修补工作中的清基是保证结合面良好黏结的重要先决条件。清基工作不认真，可能直接导致修补工程的失败。当采用无机材料修补时，修补前保持基面湿润是为了防止干燥的基面从修补材料中汲取过多水分，而导致结合面强度降低。

8.3.7 在薄层修补区基面涂刷适宜的黏结材料，可增大修补材料与基面间的黏结强度。

8.3.8 当修补区存在渗漏点时，修补前如不采取使渗水改流或先行堵漏等措施，将严重影响界面黏结强度甚至导致修补工程失败。

8.3.9 当原材料一定时，低流动度（小水灰比）砂浆或混凝土具有较高的力学性能、抗磨蚀性能以及较小的收缩，仅施工操作难度略有增加，但以此代价换取良好的修补效果是非常值得的。此外，为抹面时方便而随意加水将降低修补材料表面的抗磨蚀性能。

8.3.10 表面平整度不满足要求是诱发空蚀破坏的主要因素。

8.3.11 修补材料通常设计的流动度较小，表面基本不泌水，表面产生塑性裂纹的可能性较普通砂浆或混凝土大，尤其当现场气温较高、风速较大时更是如此。因此，修补后及时养护十分重要。

8.3.12 严寒、高温、雨雪或大风等恶劣气候将严重影响材料的凝结性能、力学性能与耐久性。

9 质量控制与验收

9.1.1 本标准对抗磨蚀混凝土提出了一些具体的规定，当与其他规范有矛盾或不一致时应按本标准执行。

9.1.2 本条规定泄水建筑物及其混凝土质量控制的七项内容，水工抗磨蚀混凝土比坝体、板梁柱混凝土的要求要严格得多，其中主要是体形（包括平面、纵横剖面）和表面平整度的控制。从混凝土受磨蚀破坏的实例，分析其破坏原因，施工质量控制不良是主要因素，其主要表现在：

- 1 混凝土原材料与配合比控制不严，强度不能满足设计要求；

- 2 表面不平整度未严格控制；

- 3 新老混凝土结合不良；

- 4 表面保护不良，出现裂缝；

- 5 残渣、杂物清理不干净。

按设计体形和施工技术要求确定抗磨蚀混凝土的施工方法与施工技术，控制施工质量，是混凝土免遭或减轻磨蚀破坏的关键。

9.1.3 本条规定了泄水建筑物混凝土施工的质量检查内容。已建泄水工程的实践证明，只要重视这些内容的质量检查，及时发现质量问题并采取措施纠正，混凝土很少发生磨蚀破坏，实践证明有的工程一直处于良好的运行状态。

9.1.4 现场取样进行抗压强度和抗磨蚀强度试验是控制混凝土质量的重要手段，是工程验收的依据。

各工程泄水建筑物种类多，混凝土等级也各有不同，如溢流坝面、鼻坎、消力池、护坦、溢洪道、泄洪洞、导流洞、底孔、中孔、表孔、排沙孔（洞）等；易发生磨蚀的部位也不尽相同，如门槽、溢流堰面、陡曲线段、鼻坎、消能工等。考虑到目前能

进行混凝土抗磨蚀强度试验的单位还不多，以及试验经费问题，进行大量试验有困难，磨蚀破坏发生在表面，故以 500m^2 过水表面作为基数较为合适。对于小于 500m^2 的，可根据其重要性、材料特点、施工条件、经济条件、工程量等确定试验项目。

9.2.2 本条规定了泄水建筑物分部工程验收时应提交的资料。泄水建筑物不同于其他建筑物，除保证正常使用外，还需要不断检查与维修，就得查找原设计、试验与施工资料，确定检查内容与修补材料，必要时还需进行水工模型试验，修改体形。这些资料为检查与维修提供了依据。

9.2.3 泄水建筑物低水流空化数部位（如门槽、溢流堰面曲线、竖曲线、反弧段、消能工等）容易发生磨蚀破坏，应对混凝土强度、表面不平整度做重点检查。施工残渣、杂物等类推移质是产生磨损的重要因素，钢筋头是产生空蚀的因素，均应进行全面检查与清理。

9.2.4 本标准按照泄水建筑物级别和各部位的重要性及其特点，从免蚀、减少磨蚀、抗磨蚀三个层次做出规定，则泄水建筑物的布置、体形、突体高度与磨平坡度等符合设计要求，清除泄水建筑物区域内及其附近的残积物是基本要求，应该予以满足。

对抗磨蚀混凝土施工质量评定标准，应该用混凝土的抗磨蚀强度。但由于抗磨蚀强度受骨料品种影响太大，各地采用的骨料性能有很大差异，所以还难以提出该指标。本标准规定混凝土强度按流速、含沙量的大小选择，其验收标准按 GBJ 107《混凝土强度检验评定标准》中“非统计方法评定”的有关条款制定，是一种过渡性验收标准。有待于工程积累资料，并进行必要的抗磨蚀强度试验，才能提出比较合理的抗磨蚀混凝土施工质量的评定标准。