

# 灌区渡槽结构安全检测分析技术的应用实践

吴晓波<sup>1</sup> 徐 潇<sup>2</sup>

1. 宁夏回族自治区水利工程建设中心 宁夏银川 750000

2. 北京中水科海利工程技术有限公司 北京 100038

**【摘要】**渡槽是灌区重要输水工程，因为其独特的高架、薄壁等结构特点，在灌区输水中具有重要的战略地位，是保证输水安全的“卡脖子”工程。目前众多的渡槽工程随着运行已步入中老年期，其安全性和耐久性堪忧，部分渡槽已出现槽身断裂、坠落，排架失稳、倒塌及大量渗漏的重大问题，对灌区的正常运行带来巨大影响。对渡槽工程定期进行检测评估，了解渡槽运行的真实状态，对保证工程安全尤为必要。本文介绍了宁夏某渡槽安全检测的情况，通过混凝土结构检测和质量评价，全面了解在役渡槽运行的情况，为工程运行管理提供了依据。

**【关键词】**渡槽工程；安全检测；应用

## 前言

渡槽是跨越山川、河流、道路、铁路的灌区重要输水建筑物，在运行过程中逐渐产生老化病害，导致建筑物的安全性、适用性和耐久性下降，功能得不到正常发挥，逐步产生安全隐患，影响工程的安全运行。我国渡槽大多始建于上世纪六七十年代，目前大部分已经临近甚至超出了使用年限，倒塌事故呈逐年增加趋势。因此，对老旧渡槽工程定期进行安全诊断具有重要意义。

宁夏某渡槽位于盐池县境内，该渡槽全长 880m，共 88 节，每节 10m。经 20 多年的运行，目前该渡槽老化严重，槽身渗漏，混凝土剥蚀，钢筋锈蚀，局部混凝土基本丧失强度；渡槽的排架存在钢筋锈蚀现象，局部存在顺筋裂缝。为了给渡槽的全面维修改造提供技术支持，本次检测评估对该渡槽的老化病害进行了全面检测，并对重点项目进行了复核计算。

## 1 安全检测与评估分析依据

安全检测评估的主要依据有：《水闸设计规范》SL265-2016、《水闸安全评价导则》SL214-2015、《水工混凝土结构设计规范》SL191-2008、《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》DL/T5251-2010、《水工混凝土试验规程》SL352-2006、《混凝土强度检验评定标准》GB/T50107-2010、《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》JGJ/T23-2011、《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS03:2007、《混凝土结构试验方法标准》GB/T50152-2012、《混凝土中钢筋检测技术规程》JGJ/T152-2008 等，以及设计图纸等水闸相关资料。

## 2 渡槽安全检测原理及方法

### 2.1 混凝土外观缺陷

针对大型渡槽高排架、大跨度的结构特点，混凝土外观缺陷检查采用无人机搭载高清摄像头进行普查，后期采用图像处理识别系统，对混凝土病害和缺陷问题进行准确判断，大幅提高现场检测的准确性和可靠性。



图 1 无人机现场检测情况

### 2.2 混凝土强度检测

回弹法检测混凝土强度是通过混凝土表面的硬度来推定混凝土的抗压强度，检测设备是回弹仪。钻孔取芯检测混凝土的强度是最直观、最准确评定混凝土强度的方法，因回弹法检测混凝土强度受诸多因素的影响，如混凝土表面平整度、碳化深度和含水量等，检测结果有一定误差。在回弹检测混凝土强度的基础上钻取适量

的混凝土芯样进行抗压强度检测来校核回弹推定强度是十分必要的。

### 2.3 混凝土碳化深度检测

混凝土碳化过程是逐渐由碱性转化为中性的过程,在正常情况下混凝土孔隙为水泥水化时析出的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和少量的钾、钠氢氧化合物所饱和而呈强碱性,其 PH 值在 13 左右。钢筋在这种介质中表面会形成氢氧化物保护膜即钝化膜,能有效抑制钢筋锈蚀。而当混凝土碳化后,混凝土的 PH 值下降至 9 以下,保护钢筋的钝化膜就处于活化状态,在氧和水的作用下钢筋便产生电化学腐蚀。钢筋一旦锈蚀,由于铁锈体积比原铁体积大 2 ~ 3 倍,这样就会使混凝土保护层开裂、剥落。

测量混凝土碳化深度的检测采用试剂法,检测时,用电锤在混凝土表面造一小孔,吹净孔内的粉尘和碎屑,向孔内喷入 1% 的酚酞酒精溶液,然后用碳化深度测量尺测量碳化和未碳化交界面的垂直距离,测量多点取其平均值。混凝土碳化深度测试方法是按照《回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》(JGJ/T23-2011) 进行。

### 2.4 钢筋保护层厚度检测

用钢筋定位仪测试混凝土保护层厚度。钢筋定位仪是利用钢材的导磁特性,据探头发出的电磁脉冲衰减来判定混凝土中钢筋的位置及保护层的厚度。

钢筋扫描仪由探头和主机两部分组成,探头部分的工作原理为电磁脉冲。在探头的内部装有两组线圈,一组为磁场线圈,另外一组为感应线圈。磁场线圈在所检查的混凝土中产生高脉冲的一次电磁场,如混凝土中有金属物体,则该物体将感应产生二次电磁场(位于前述的第一次电磁场之内)。每一次磁场线圈所产生的电磁场的脉冲间隙会引起第二次电磁场的衰减,这样就使感应线圈产生电压变化。因此,根据这个电压的变化通过数学计算得出混凝土中的钢筋间距和保护层厚度。

### 2.5 钢筋锈蚀状态检测

钢筋混凝土耐久性为钢筋混凝土结构应具有的基本功能之一。耐久性的好坏决定着结构的使用寿命。混凝土结构耐久性的评估和对策是已有建(构)筑物可靠性评定的重要组成部分。钢筋锈蚀的危害是影响结构耐久性和安全性的重要因素。钢筋是混凝土结构中的主要受力材料,钢筋锈蚀截面损失大小对结构的承载能力有很大的影响。严重时甚至引起结构破坏和性能的改变。在结构试验分析中,可以直接通过对构件进行破型,取出钢筋以量测其锈蚀量,计算平均重量损失率以及最大截面损失率而进行分析。

然而在对实际结构进行耐久性评定和可靠性鉴定

中,不可能对每一锈蚀部位均进行钢筋取样以评定锈蚀量,对于某些重要的结构部位取样甚至是不可能的。因而需要在不破坏结构安全的情况下,通过外观检查、根据锈蚀裂缝宽度、钢筋直径、保护层厚度、混凝土强度、钢筋所处的位置来判断钢筋的锈蚀程度以及锈蚀损失率。

混凝土结构内钢筋锈蚀实际上是钢筋电化学反应结果,钢筋锈蚀将使混凝土握裹力和钢筋有效截面积下降,并可能由于因锈蚀而产生的膨胀而造成混凝土保护层的崩落,影响整体结构的稳定。导致钢筋锈蚀的原因有两个:第一是混凝土的碳化深度超过保护层的厚度,第二是  $\text{Cl}^-$  等酸性离子的侵蚀作用。对钢筋锈蚀的检测是按照《水工混凝土试验规程》(SL352-2006) 有关混凝土中钢筋半电池电位方法进行。

由图 2 可见钢筋锈蚀测量仪是通过半电池电位法(测量混凝土保护层的电位值)来判断钢筋锈蚀状态。因为这种方法存在着许多难以克服的影响因素,如混凝土的含水率,杂散电场干扰等,所以国内的一些规范如《水工混凝土试验规程》(SL352-2006) 也只给出了概率性的判断结果,评估标准如下:

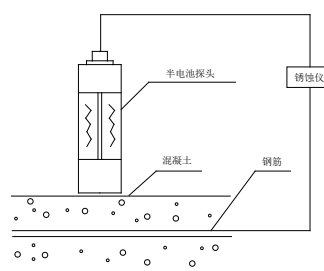


图 2 钢筋锈蚀测量原理图

半电池电位正向大于  $-200 \text{ mV}$ , 此区域钢筋发生锈蚀概率小于 10%;

半电池电位在  $-200 \sim -350 \text{ mV}$ , 此区域钢筋锈蚀状态不确定,可能有锈蚀;

半电池电位负向大于  $-350 \text{ mV}$ , 此区域钢筋锈蚀概率  $> 90\%$ 。

为了提高检测结果的可靠性,我们采用的方法是先测定所选每条钢筋的沿程各点的电位值,然后选择出有代表性的电位值,将这些部位的混凝土保护层剖开,使钢筋暴露来观察钢筋实际锈蚀状况。

## 3 渡槽结构安全状态评价

### 3.1 混凝土外观缺陷结果

渡槽槽壳外侧面存在普遍轻微剥蚀现象,且 88 节

槽壳中有 47 节 ( 占比 53.4% ) 槽壳外侧面出现裂缝并有渗漏痕迹, 但是经过槽壳内部涂层防护处理后, 裂缝渗漏的病害基本能够得以消除。渡槽支撑结构、支承基础无明显不均匀沉降和变形; 排架主要问题为顺筋裂缝、钢筋锈胀破坏, 可见的 85 个排架中有 79 个排架出现顺筋裂缝, 占比高达 93%; 出现锈胀破坏的占比达 53%。渡槽拉梁存在一定程度的病害。528 根拉梁中存

在顺筋裂缝的为 96 根, 占比 18.2%; 开裂严重的 28 根, 占比 5.3%; 混凝土崩落的为 22 根, 占比 4.2%。

### 3.2 混凝土强度检测结果

采用回弹法检测槽壳外侧及排架混凝土的强度, 根据回弹测值推算混凝土的抗压强度, 各部位回弹检测的强度结果见表 1。此外, 还采用超声回弹综合法对部分排架进行了超声回弹检测, 结果见表 2。

表 1 回弹法检测渡槽混凝土强度统计表

编号	检测部位	测区数量	平均强度 (MPa)	标准差 (MPa)	变异系数 (%)	混凝土强度推定值 (MPa)
1	1# 渡槽外侧	10	23.5	3.5	15.0	17.7
2	2# 渡槽外侧	10	21.9	3.0	13.6	17.0
3	3# 渡槽外侧	10	27.0	4.5	16.7	19.6
4	4# 渡槽外侧	10	30.0	1.4	4.7	27.7
5	5# 渡槽外侧	10	28.7	1.6	5.6	26.0
6	6# 渡槽外侧	10	24.3	3.4	14.0	18.7
7	7# 渡槽外侧	10	27.6	2.1	7.8	24.1
8	8# 渡槽外侧	10	26.0	1.7	6.4	23.3
9	87# 渡槽外侧	10	28.5	1.2	4.3	26.5
10	88# 渡槽外侧	10	29.4	0.9	3.2	27.8
11	2 号排架	10	29.4	2.9	9.9	24.6
12	5 号排架	10	30.3	0.5	1.7	29.5
13	8 号排架	10	20.7	1.2	5.8	18.7
14	11 号排架	10	28.0	2.4	8.5	24.1
15	14 号排架	10	27.1	2.1	7.9	23.6
16	17 号排架	10	26.5	3.2	12.2	21.2
17	20 号排架	10	28.6	0.6	2.0	27.7
18	23 号排架	10	27.6	2.8	10.0	23.1
19	26 号排架	10	28.9	0.6	1.9	28.0
20	29 号排架	10	28.5	1.2	4.2	26.6
21	32 号排架	10	30.5	2.1	6.8	27.1
22	35 号排架	10	29.0	0.6	2.1	28.0
23	38 号排架	10	28.7	1.5	5.1	26.4
24	41 号排架	10	29.0	0.9	3.2	27.5
25	44 号排架	10	26.6	3.3	12.4	21.1
26	47 号排架	10	29.6	1.1	3.8	27.8
27	50 号排架	10	32.7	2.4	7.5	28.7
28	53 号排架	10	27.6	3.7	13.5	21.4
29	56 号排架	10	27.9	1.6	5.7	25.3
30	59 号排架	10	35.5	4.4	12.5	28.2
31	62 号排架	10	29.6	1.7	5.8	26.8
32	65 号排架	10	28.9	1.3	4.6	26.8
33	68 号排架	10	29.8	2.2	7.3	26.2
34	71 号排架	10	28.6	0.5	1.9	27.8
35	74 号排架	10	29.3	0.7	2.5	28.0
36	77 号排架	10	28.7	1.0	3.5	27.1
37	81 号排架	10	28.9	1.3	4.6	26.7
38	83 号排架	10	27.7	1.7	6.0	25.0
39	86 号排架	10	28.4	1.7	5.9	25.6



表 2 超声回弹综合法检测渡槽混凝土强度统计表

编号	检测部位	测区数量	测区声速平均值 $v$ (m/s)	平均强度 (MPa)	标准差 (MPa)	变异系数 (%)	混凝土强度推 定值 (MPa)
1	8号排架	10	3857.1	24.2	3.5	14.3	18.5
2	14号排架	10	4741.0	41.9	5.0	12.0	33.6
3	20号排架	10	4388.5	38.4	2.1	5.4	35.0
4	23号排架	10	4421.1	37.9	3.7	9.8	31.8
5	29号排架	10	4291.0	36.9	2.7	7.3	32.5
6	35号排架	10	4311.4	37.7	3.1	8.1	32.6
7	41号排架	10	3755.2	30.0	3.3	10.9	24.6
8	47号排架	10	3708.9	29.8	1.9	6.2	26.7
9	53号排架	10	3751.8	28.9	6.1	21.0	18.9
10	59号排架	10	4101.3	40.1	6.7	16.7	29.1
11	65号排架	10	3920.9	32.4	6.3	19.4	22.1
12	71号排架	10	4056.1	33.8	4.8	14.1	26.0
13	77号排架	10	3820.1	30.6	2.0	6.7	27.2
14	83号排架	10	4201.9	35.1	5.9	16.9	25.3
15	86号排架	10	4029.9	33.2	3.1	9.5	28.0

采用普通回弹法推定的混凝土强度分别为：10个槽壳外侧混凝土抗压强度的最小值为 17.0MPa，最大值为 27.8MPa，平均值为 22.8MPa；29个排架混凝土强度的最小值为 18.7MPa，最大值为 29.5MPa，均值为 25.8MPa。此外，超声回弹综合法检测排架立柱测区声速平均值 4090m/s，强度均值为 27.5MPa。

渡槽槽壳混凝土原设计标号为 #250，排架混凝土原设计标号为 #200。检测结果统计，槽壳混凝土强度低于 25MPa 的有 6 处，占比 60%，平均值低于原设计值；

排架混凝土强度低于 20MPa 的仅有 1 处，平均值高于原设计值。

由于渡槽槽壳厚度较薄，仅为 7cm，不具备取芯条件，为了解渡槽混凝土强度的现状，给回弹强度做相互验证、后期复核计算及修补加固提供相关依据。在渡槽排架底座处选取有代表性的部位，钻取了 4 个芯样，芯样外观较密实，光滑。芯样的钻取位置及抗压强度见表 3。

表 3 混凝土芯样的抗压强度

对应部位	编号	直径 (mm)	高 (mm)	破坏荷载 (KN)	抗压强度 (Mpa)	推定值 (MPa)
52# 排架底座	HJK-52#-1	100.36	100.82	232.731	29.4	21.0
	HJK-52#-2	100.37	101.91	99.598	12.6	
27# 排架底座	HJK-27#-1	100.56	101.65	291.419	36.7	34.9
	HJK-27#-2	100.41	100.66	262.248	33.1	
50# 排架底座	HJK-50#-1	100.30	100.37	204.213	25.9	25.8
	HJK-50#-2	100.33	100.58	232.226	29.4	
	HJK-50#-3	100.43	101.16	174.429	22.0	
29# 排架底座	HJK-29#-1	100.37	101.02	242.728	30.7	29.0
	HJK-29#-2	100.33	101.48	215.448	27.3	

根据实际工程经验，对比芯样抗压强度试验可见，对于年代比较久远的水工混凝土，利用回弹法推定出的混凝土强度比实际的要小，有些情况下要小很多。分析主要原因一是由于水工混凝土工作环境比较严酷，表面劣化对回弹值的影响较大；二是强度碳化修正过于严苛。

基于此，可以判断红井坑渡槽混凝土强度基本满足原设计要求。

### 3.3 混凝土碳化深度检测结果

对典型渡槽槽壳外侧、排架进行了混凝土碳化深度检测的结果见 4 所示。

表4 典型渡槽混凝土的碳化深度

部位	碳化深度 (mm)	部位	碳化深度 (mm)
1# 渡槽外侧右侧	27.20	29 号排架左侧立柱	38.84
1# 渡槽外侧左侧	18.50	32 号排架右侧立柱	14.42
2# 渡槽外侧右侧	22.48	32 号排架左侧立柱	14.64
2# 渡槽外侧左侧	20.46	35 号排架右侧立柱	25.22
3# 渡槽外侧右侧	23.28	35 号排架左侧立柱	26.82
3# 渡槽外侧左侧	27.24	38 号排架右侧立柱	20.26
4# 渡槽外侧右侧	25.32	38 号排架左侧立柱	29.84
4# 渡槽外侧左侧	27.46	41 号排架右侧立柱	12.42
5# 渡槽外侧右侧	31.24	41 号排架左侧立柱	21.64
5# 渡槽外侧左侧	30.42	44 号排架右侧立柱	34.86
6# 渡槽外侧右侧	28.20	44 号排架左侧立柱	39.82
6# 渡槽外侧左侧	37.20	47 号排架右侧立柱	35.82
7# 渡槽外侧右侧	35.40	47 号排架左侧立柱	36.86
7# 渡槽外侧左侧	33.40	50 号排架右侧立柱	31.46
8# 渡槽外侧右侧	20.80	50 号排架左侧立柱	30.82
8# 渡槽外侧左侧	22.60	53 号排架右侧立柱	32.22
87# 渡槽外侧右侧	19.28	53 号排架左侧立柱	37.86
87# 渡槽外侧左侧	24.32	56 号排架右侧立柱	29.24
88# 渡槽外侧右侧	30.80	56 号排架左侧立柱	43.82
88# 渡槽外侧左侧	39.10	59 号排架右侧立柱	25.26
2 号排架右侧立柱	27.82	59 号排架左侧立柱	23.82
2 号排架左侧立柱	20.46	62 号排架右侧立柱	31.86
5 号排架右侧立柱	36.48	62 号排架左侧立柱	30.24
5 号排架左侧立柱	31.62	65 号排架右侧立柱	31.24
8 号排架右侧立柱	41.82	65 号排架左侧立柱	40.22
8 号排架左侧立柱	41.20	68 号排架右侧立柱	15.42
11 号排架右侧立柱	41.22	68 号排架左侧立柱	19.24
11 号排架左侧立柱	14.24	71 号排架右侧立柱	10.46
14 号排架右侧立柱	40.82	71 号排架左侧立柱	33.22
14 号排架左侧立柱	16.22	74 号排架右侧立柱	28.22
17 号排架右侧立柱	38.24	74 号排架左侧立柱	23.44
17 号排架左侧立柱	36.26	77 号排架右侧立柱	44.62
20 号排架右侧立柱	10.26	77 号排架左侧立柱	43.66
20 号排架左侧立柱	15.64	81 号排架右侧立柱	33.24
23 号排架右侧立柱	10.22	81 号排架左侧立柱	31.46
23 号排架左侧立柱	15.86	83 号排架右侧立柱	40.44
26 号排架右侧立柱	38.24	83 号排架左侧立柱	24.88
26 号排架左侧立柱	24.82	86 号排架右侧立柱	38.42
29 号排架右侧立柱	48.86	86 号排架左侧立柱	35.24

通过上表可以看出,渡槽槽壳外侧、排架混凝土碳化深度都较深,槽壳外侧混凝土碳化深度平均值达到27.24mm,排架混凝土碳化深度平均值达到29.51mm,碳化深度大于原设计保护层的厚度,容易引起钢筋锈蚀的发生。

### 3.4 钢筋保护层厚度检测结果

检测结果显示,渡槽槽壳混凝土的钢筋保护层厚度平均值为36.7mm,排架混凝土的钢筋保护层厚度平均

值为36.8mm,满足设计要求。

### 3.5 钢筋锈蚀状态检测结果

钢筋是否发生锈蚀可采用半电池电位法测定,本次检测由于场地原因,主要针对渡槽支撑结构进行了钢筋锈蚀检测,同时在典型槽壳(4#槽壳)外侧进行了钢筋锈蚀检测,典型部位钢筋锈蚀电位等值线图如下。

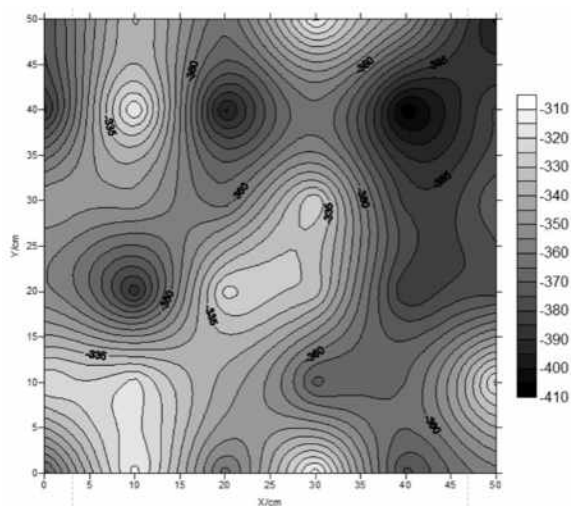


图 4 4# 槽壳外侧钢筋锈蚀电位等值线图

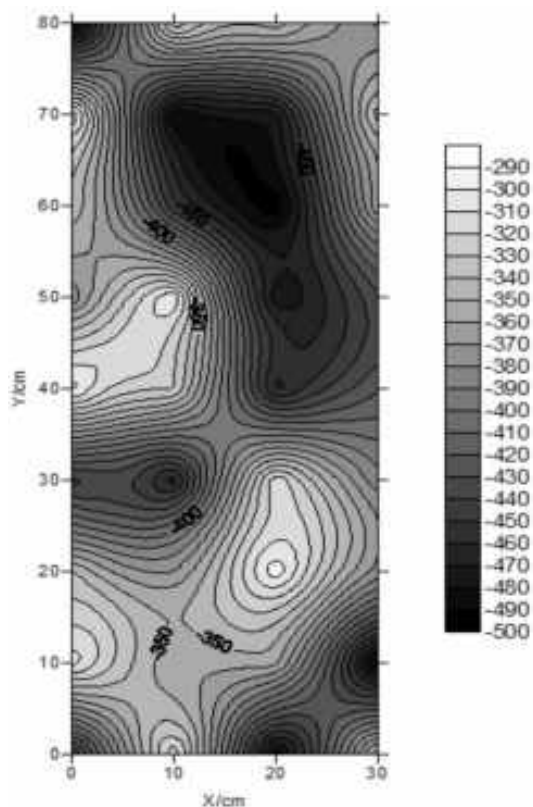


图 5 15# 立柱钢筋锈蚀电位等值线图

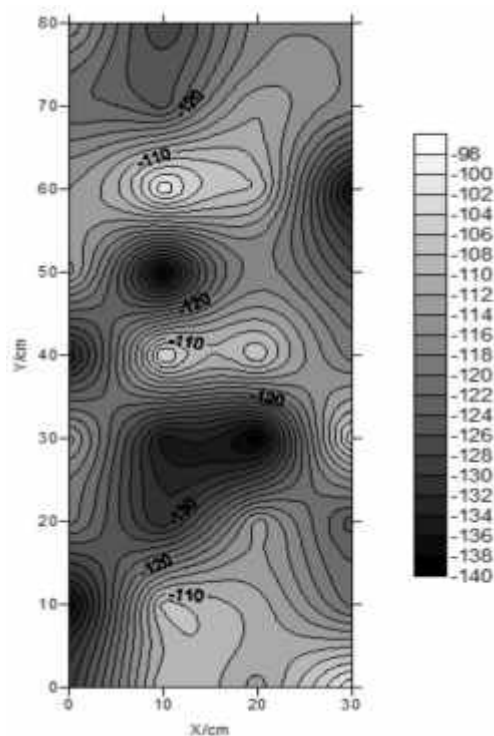


图 6 73# 底座钢筋锈蚀电位等值线图

本次检测主要针对渡槽排架进行钢筋锈蚀检测，一共检测 23 个排架，其中半电池电位正向大于  $-200\text{mV}$ ，发生锈蚀的概率小于 10% 的排架数为 9 个，半电池电位小于  $-350\text{mV}$ ，发生锈蚀概率大于 90% 的排架数为 7 个，其余半电池电位介于  $-200\text{mV} \sim -350\text{mV}$  之间，锈蚀状态不确定；4# 槽壳外侧半电池电位小于  $-350\text{mV}$ ，发生锈蚀概率大于 90%。

结合现场情况判断出现顺筋裂缝的排架已发生轻微锈蚀，保护层完好的尚未发生锈蚀。

#### 4 结语

(1) 目前，渡槽槽壳已进行了混凝土表面防护，能够有效解决渗漏问题，增加槽壳内壁混凝土的耐久性和安全性。外部排架部位出现顺筋裂缝的部位需要及时修补和加固处理。

(2) 由于渡槽槽壳外侧、排架混凝土碳化深度都较深，容易引起钢筋锈蚀的发生，故有必要对渡槽槽壳外壁和排架进行混凝土表面防护处理。

(3) 渡槽多属于钢筋混凝土薄壁结构，具有高架、大跨度等结构特点，针对渡槽混凝土病害和缺陷问题，使用无人机搭载高清摄像头进行图像采集，后期通过图像处理技术，可大幅提高现场检测的准确性和可靠性。

(4) 采用混凝土缺陷普查、混凝土强度检测、碳

化深度检测、钢筋保护层厚度检测、钢筋锈蚀程度检测等手段,能够基本了解典型渡槽工程混凝土耐久性劣化情况。

### 【参考文献】

- [1] 张家宏,黄昊.渡槽结构病害检测评级与安全评估.《中国水利学会水工专业委员会第十届年会论文集》,2012: 150-154.
- [2] 张家宏,黄昊.渡槽结构病害检测评级与安全评估.《第十二届全国水工混凝土建筑物修补加固技术交流会论文集》,2013: 81-84.
- [3] 岳跃真,鲁一晖.杭淞干渠将军山渡槽混凝土结构现场检测与安全评估.《第十一届全国水工混凝土建筑物修补与加固技术交流会论文集》,2011: 92-100.
- [4] 陈维江,岳跃真,关遇时.辛庄山洪桥混凝土检测及安全评估.《第七届全国水工混凝土建筑物修补加固技术交流会》,2003: 75-80.
- [5] 倪明,张春禄,王慧智,李萌.北京市普济闸现场检测与安全评估.《第十一届全国水工混凝土建筑物修补与加固技术交流会论文集》,2011: 120-126.
- [6] 禹作利,夏世法,杨伟才,李萌.北京玉渊潭进水闸安全检测评估与缺陷处理.《第十届全国水工混凝土建筑物修补与加固技术交流会论文集》,2009: 152-159.
- [7] 李萌,孙粤琳,李秀琳.某水电站厂房混凝土结构检测与安全评估分析.,2016: 364-368.