

水电站引水系统钢岔管 在动态水压作用下的应力分析与测试

黄子云¹ 雷晓燕¹ 陆亦庄¹ 宋京伟²

袁志华¹ 王泽远¹ 余荷根¹

(¹ 土木工程系 ² 机械工程系)

摘 要 水电站引水系统的关键部位——钢岔管的设计与制作一般采用传统的分析方法和施工工艺,在对消除焊接应力的影响很难准确测定的情况下采用对钢岔管的裸露状态进行有限元分析计算,且往往只对小型模型作静水压力试验用以校核¹⁹。为进一步搞清钢岔管在工作状态下的实际受力情况,1995 年 9 月我们对江西东津水电站引水系统钢岔管进行了有限元应力分析、焊接应力分析、一号机组工作状态下钢岔管应力测试工作¹⁹。测试分析结果表明:现有设计存在较大的潜力,如果在设计上有所改进,可以节约大量投资,取得显著的经济效益¹⁹。

关键词 引水系统;钢岔管;应力分析;应力测试

分类号 O 348. 2

0 引 言

应江西省水电工程局的邀请,我们在 1995 年 5 月至 9 月期间对江西东津水电站引水系统钢岔管进行了有限元应力分析、焊接应力分析、一号机组工作时钢岔管在静水压力作用下的静态应力测试和一号机组抛负荷时的动态应力测试¹⁹。

钢岔管在水电站引水系统中处在把动态高压下的水流由主流导入各分流的关键部位,在水流的高压冲击作用下,由于钢岔管自身外形奇特使其受力情况相当复杂,通常在设计中是采用岔管在静水压力作用下进行有限元分析,只是用增大动态系数的方法来估计动态水压作用下的受力情况¹⁹。这无疑是不够准确的¹⁹。

实际上,钢岔管是在外包 1 m 厚混凝土后再埋在地下工作的,这种边界条件与设计的假定相差很远,以前也只做过一些小型钢制模型的静水压力试验,为反映实际情况我们进行了这项应力分析和测试工作¹⁹。

1 引水系统钢岔管有限元应力分析

1.1 钢岔管的有限元分析

钢岔管的有限元分析是在考虑外包混凝土的情况下进行的,其边界条件与实际情况比较符合¹⁹有限元分析采用的计算软件是国际著名岩土工程数值分析专家,奥地利因斯布鲁克大学 G·Swoboda 教授所领导的研究小组(雷晓燕教授参与了该程序开发中的部分工作)历经数十年开发的大型结构分析程序 FINAL 在计算机工作站和微机上同时进行对比分析¹⁹。该程序可以对岩土工程中的各种复杂结构进行全面的物理力学特性模拟分析,包括 32 种常用和特殊单元¹⁹。经过数千道考题的验证,证明该程序是可靠和有效的¹⁹。岔管的有限元分析涉及 7 571 个自由度,在 SGI 工作站上进行计算分析可得到精确满意的结果¹⁹。

1.2 钢岔管有限元计算模型

1.2.1 计算模型

钢岔管有限元计算模型如图 1 所示,岔管中心水平剖面如图 2¹⁹。实际计算中考虑到问题的对称性,仅取一半作为计算模型¹⁹。

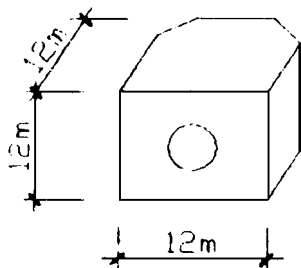


图 1 钢岔管有限元计算模型

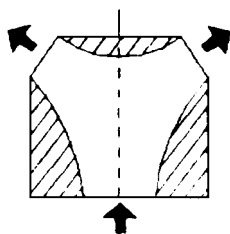


图 2 钢岔管中心水平剖面

钢岔管部分采用八结点空间壳单元,每个结点具有 3 个位移分量,2 个转角共 5 个自由度,计算出应力和位移的精度均较高¹⁹。钢岔管加筋肋简化成空间梁单元,且考虑变截面因素¹⁹。

浇灌的混凝土采用 20 结点等参数块体单元,可模拟不规则的结构边界¹⁹。考虑到后浇灌的混凝土与钢岔管之间在混凝土结硬过程中的水化作用产生的“不完全粘接”性能,在混凝土与钢岔管之间布置一层厚 1 cm 的 GOODMAN 夹层单元,以模拟混凝土与钢岔管之间的空隙和非完全粘接效应¹⁹。夹层单元用切向刚度和法向刚度来描述其物理性质,通过选择适当的刚度参数即可模拟夹层的非完全粘接性质¹⁹。

钢岔管有限元计算模型共划分 88 个空间壳单元,36 个三维梁单元,88 个夹层单元,364 个块体单元,结点总数为 2 296 个¹⁹。

1.2.2 边界条件

有限元分析中,边界条件的设置对计算结果有较大的影响¹⁹。在东津电站引水系统钢岔管有限元计算中,我们在进水管的端部沿水流方向(纵向)设置约束,限制其沿纵向的位移¹⁹。对称面上设置与对称面垂直的约束,混凝土四周与坚硬的岩体相接触,其变形可忽略不计,相应的边界处理成位移约束¹⁹。

1.2.3 材料参数与荷载工况

有限元分析中,共涉及四种材料,它们分别为钢岔管、加筋肋、混凝土和夹层,其中前三种材料假设为各向同性的弹性体¹⁹。全部材料参数见表 1 和表 2¹⁹。

表 1 材料各项参数			
材 料	容重(kN/m ³)	弹性模量(MPa)	泊松比
钢岔管	78.1	2.1×10^5	0.3
加筋肋	78.1	2.1×10^5	0.3
混凝土	25.0	1.4×10^4	0.16

表 2 夹层材料的剪切刚度系数和法向刚度系数		
材 料	剪切刚度系数 (KN/m)	法向刚度系数 (KN/m)
夹 层	1.4×10^6	1.4×10^6

有限元分析中的荷载工况为静水压力,岔管中心水压力为 643.5 kN/m^2 ,方向为垂直于管壁单元¹⁹。

1.3 结果分析

根据上述模型,我们进行了钢岔管有限元分析,其计算结果本文只对图 3 中的关键部位(焊缝)进行了整理¹⁹。

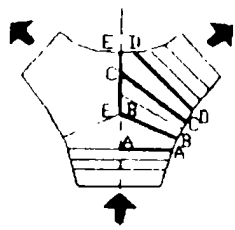


图 3 岔管焊缝位置分布图

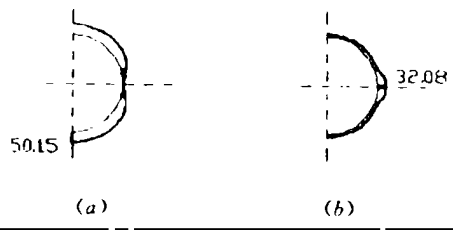


图 4 A-A 剖面应力分布图

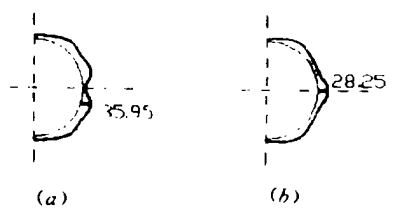


图 5 B-B 剖面应力分布图

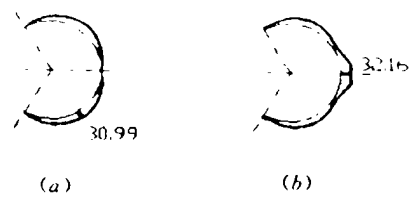


图 6 C-C 剖面应力分布图

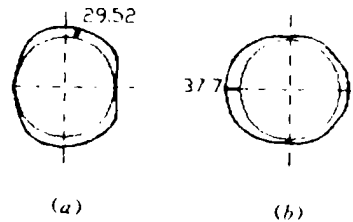


图 7 D-D 剖面应力分布图

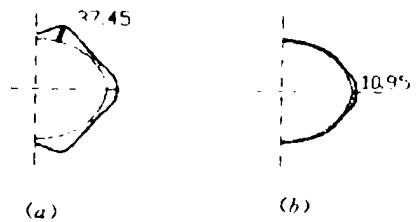


图 8 E-E 剖面应力分布图

其中:图 4(a)、(b) 分别为 A-A 剖面环向应力(沿圆周向)和纵向应力(与圆周垂直方向);图 5(a)、(b) 分别为 B-B 剖面环向应力和纵向应力;图 6(a)、(b) 分别为 C-C 剖面环向

应力和纵向应力;图 7(a)、(b) 分别为 D-D 剖面环向应力和纵向应力;图 8(a)、(b) 分别为加筋肋 E-E 剖面环向应力和纵向应力¹⁹。

作为本分析的对比,我们同时进行了钢岔管裸露设计及无加筋肋情况下钢岔管的应力分析,根据这些计算,可得到如下结论:

(1) 混凝土浇灌式钢岔管中最大应力为拉应力,发生在 A-A 剖面中心线上、下顶点沿环线方向,最大值约 50 MPa,远低于 16 锰钢的屈服极限 350 MPa,由于混凝土自重的作用,环向应力上、下两顶点的最大值逐渐向过圆心的水平线减小;反之,纵向应力则逐渐增大¹⁹。

(2) 加筋肋部位由于在岔管上增加了月牙肋,其环向和纵向应力都不大¹⁹。月牙肋的作用使得两个支管相交线处的最大拉应力减小了约 2.7 倍¹⁹。

(3) 钢岔管裸露设计中,最大应力约为混凝土浇灌式最大应力的 2.36 倍,其最大值约为 118 MPa¹⁹。

计算表明,东津电站引水系统钢岔管设计是安全可靠的,且有较大安全度¹⁹。

2 钢岔管焊接应力测试分析

根据钢岔管的焊接残余应力的特点,又考虑到测试时不能破坏被测件,因此,测试采用无损检测的磁测应力方法,测试仪器采用自行研制的磁测应力仪¹⁹。该仪器使用方便,只需将传感器放置在被测部位,则可测出该点的应力大小及应力方向(拉或压),对被测件无任何损伤¹⁹。

我们对钢岔管焊接后的部分焊缝焊接残余应力和对其实施退火后的残余应力进行了测试,测试时选择了部分在工作时应力相对较大部位的几条焊缝,共布置了 160 个测点,基本覆盖了工作应力较大的区域¹⁹。其结果分析如下:

(1) 测试数据表明,钢岔管焊接残余应力很小,(退火前平均应力为 30 MPa,最大应力为 66 MPa)说明焊接工艺制定合理¹⁹。

(2) 根据测试结果分析,退火前后应力方向发生了明显改变,抽测未经退火的点,其应力大小、方向基本没有变化¹⁹。退火前的残余应力是焊缝冷却过程收缩产生的,其方向基本是垂直于或接近垂直于焊缝的拉应力,它的存在对焊缝及热影响区形成拉开或拉裂焊缝的趋势,退火后应力方向基本都为平行于或接近平行于焊缝方向的拉应力(垂直于焊缝为压应力),是退火时整体冷却过程产生的收缩应力,从应力的方向来看对焊缝不会产生拉开的作用¹⁹。可以认为退火工艺消除了焊接残余应力¹⁹。

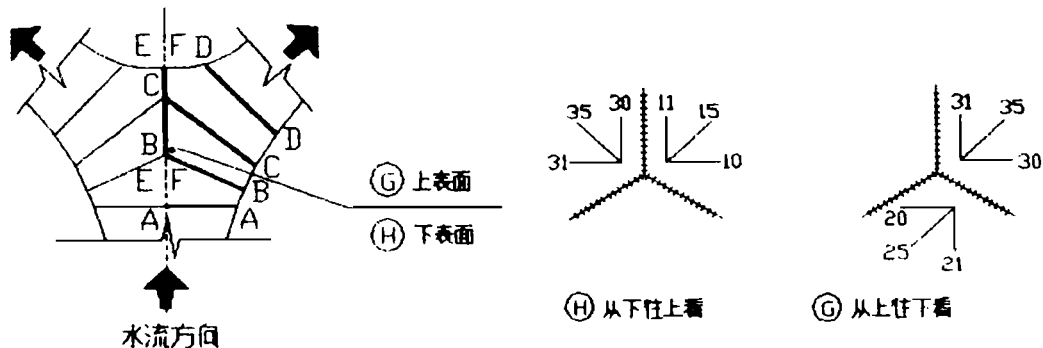
(3) 有近四十个点焊缝区段退火前后应力大小和方向变化相对较小,该段在焊接加工时采用了预热保温工艺,这一工艺起到了退火的作用,因此退火后应力变化不大,根据这一结果建议今后如采用了预热保温的焊接工艺,可取消退火工艺¹⁹。

(4) 本测试方法测出的应力包括钢在轧制、运输、切割及焊接等过程中的综合应力之和,根据测试未经加工的钢板和仅切割开的钢板表明,焊接前钢板本身的基础应力大约在 4~12 MPa 范围内,如减去这一基础应力,钢岔管退火后的残余应力最大点约为 60 MPa,平均约为 30 MPa¹⁹。

3 静态应力测试分析

3.1 测点布置

如测点布置图 9 所示共在 A、B、C、D、E、F 六个截面上和 G、H 两个区域内布置了 53 个有



测点所在截面分布图

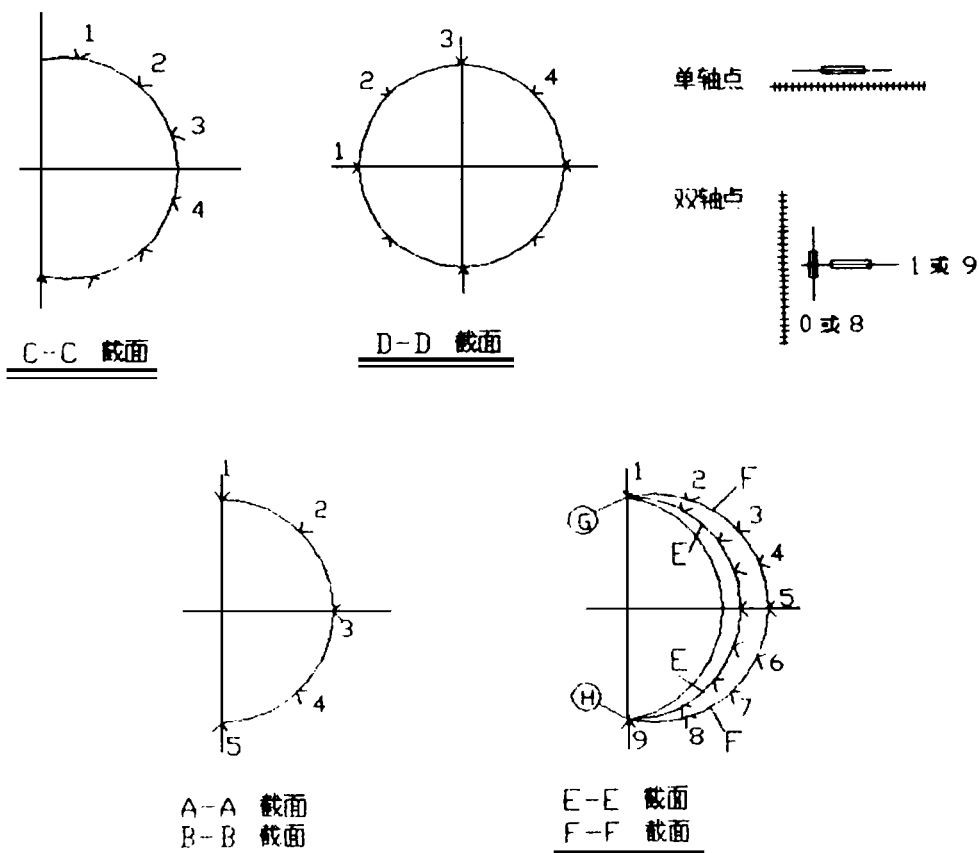


图 9 钢岔管测点布置图

效测点,其中F截面(即月牙肋外表面上)有单轴测点4个;G、H区测点各两个,其余均为布置在A、B、C、D、E截面上的双轴测点¹⁹。

测点的表示方法如图9所示,即字母表示测点所在位置,下标的第一个数字表示测点号,第二个数字表示所测应力的方向,其中8和0的方向相同但各处于结构的对称位置(8为校核点),9和1的关系亦同¹⁹。

3.2 测试数据

当大坝的水位标高为 183.84 m 时,岔管内水压为 0.64 MPa,其静态测试结果见表 3,最大应力及主应力计算结果见表 4¹⁹。为便于和有限元计算结果对比,将测试结果列入图 10 和图 11 中¹⁹。

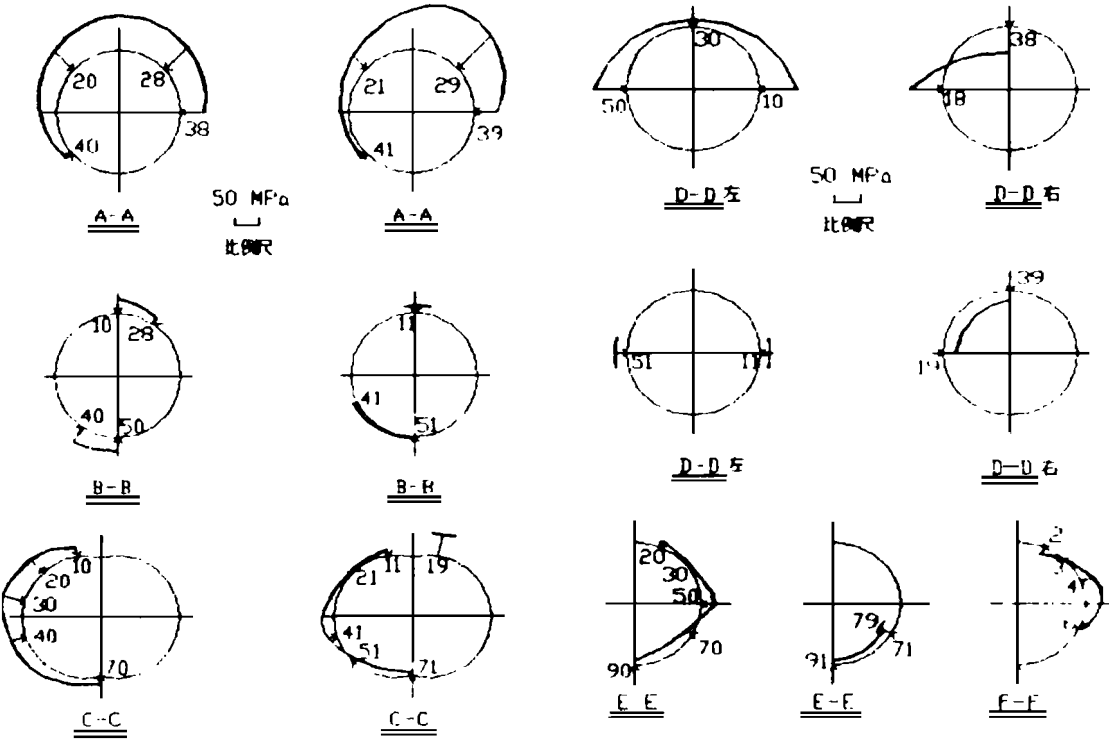


图 10 静态测试应力分布图 1

图 11 静态测试应力分布图 2

表 3 管壁各测点的实测应力

MPa

测点	A 20	A 40	A 28	A 38	A 21	A 41	A 29	A 39	B 10	B 40	B 50	B 28
应力	54	14	65	48	37	13	96	46	30	34	26	14
测点	B 11	B 41	B 51	C 10	C 20	C 30	C 40	C 70	C 11	C 21	C 41	C 51
应力	13	9	14	17	36	48	32	15	10	4	17	-7

表 3(续)

测点	C71	C19	D10	D30	D50	D18	D38	D11	D51	D19	D39	E20
应力	-8	44	71	15	46	60	-54	16	21	-26	-20	13

测点	E30	E50	E70	E71	E78	E79	E90	E91	F2	F3	F4	F6
应力	6	23	-14	-17	-4	-26	-8	-9	-16	5	25	11

表 4 最大应力及主应力计算结果

平面应力	最大应力	最小主应力	最大主应力方向
G1	89.9	44.9	35.2°
G2	15.1	-29.9	-22.1°
H1	36.9	26.8	-11.1°
H3	11.8	-16.1	63.5°

另外,在测试过程中发现:岔管内静水压力第一阶段由 0 增加至 0.16 MPa 时,管壁应力增长速度很快;第二阶段水压由 0.16 增加至 0.32 MPa 时管壁应力增长速度明显下降;第三阶段水压由 0.32 MPa 增至 0.64 MPa 时,绝大多数点管壁应力增长速度缓慢 19 主要测点的管壁应力—水压力曲线见图 12 19.

3.3 结果分析

(1) 本次应力测试全部采用在岔管壁上粘贴应变计(分单轴、双轴、三轴三种),用导线引出,待外包混凝土结硬后进行试验,用高性能 7V 13 采集器读取数据 19.

我们在布点过程中采用了一定的防潮措施 19 但可能导线接长的接头部位防潮措施出现一些问题,致使在测试时测点和被测体间的绝缘度降低,测试时测值产生较大的零漂(在数据整理过程中我们进行了零漂修正),因此,有的测试数据存在较大的误差,特别是在数值较小的情况下,个别测点可能产生拉压应力反向效应,在以下分析中我们将考虑这一影响 19.

(2) 测试结果表明沿 A—A、B—B、C—C、D—D 截面的环向拉应力(沿焊缝方向,即下标第 2 位数字为 0 或 8 的点)比纵向拉应力(即下标第 2 位数字为 1 或 9 的点)也就是垂直焊缝方向

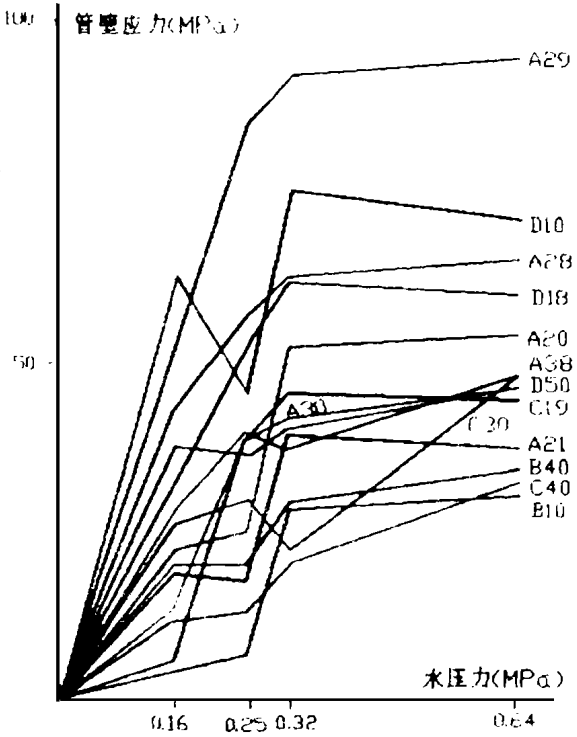


图 12 管壁应力—水压力静态测试曲线

的拉应力要大,前者多为 30 至 70 MPa,后者除 A 29 点为 96 MPa 外均不超过 50 MPa,整个数值并不大¹⁹。

(3) E-E 截面因为有月牙肋存在,沿焊缝方向的最大拉应力仅 E 50 点为 23 MPa,垂直焊缝方向最大压应力仅 E 79 点为 26 MPa¹⁹。在月牙肋外表面上的最大的拉应力仅 F 4 为 25 MPa,其数值很小,也说明月牙肋的作用很大¹⁹。

(4) 从图 12 可以看出当水压力由 0 上升至 0.32 MPa (约为最大值的 50%) 时,管壁压应力增长很快,几乎达到最高应力状态,其后应力增长缓慢,这说明岔管的外包混凝土和管壁间存在着一定的程度的“空隙”,一旦当管壁在水压力作用下产生径向位移,管壁环向拉应力增加至将“空隙”挤紧,混凝土对管壁形成固定支撑,使管壁应力不再会按水压力增大的比例增加¹⁹。

4 动态应力测试分析

4.1 测点布置

共布置 7 个测点,每个测点都相应地设置了一个补偿点,因测点的绝缘电阻不够,只有 D 1 测点的测量数据准确、有效¹⁹。

4.2 测试状态

动态测试的目的是动态测量 1[#] 机组在运行过程中分别为 25%、50%、75%、100% 四种情况甩负荷后钢岔管内因水压变动而产生的应力变化¹⁹。此时,大坝的水位标高为 183.84 m¹⁹。

4.3 测试结果

D 1 点动态测试曲线如图 13¹⁹。

4.4 结果分析

根据以上测试结果可计算出:

25% 甩负荷时: 0.00 MPa

50% 甩负荷时:

$$1 \times \frac{1000}{500} \times \frac{50}{8.5} = 11.76 \mu\epsilon \times \frac{2.1 \times 10^5}{10^6} = 2.47$$

MPa

75% 甩负荷时:

$$2 \times \frac{50}{8.5} = 11.76 \mu\epsilon \times \frac{2.1 \times 10^5}{10^6} = 2.47 \text{ MPa}$$

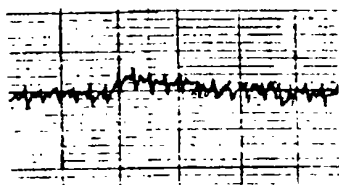
100% 甩负荷时:



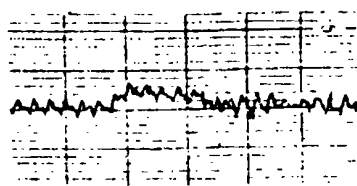
(a) 25% 甩负荷时
(记录仪输入电压为 500 mV)



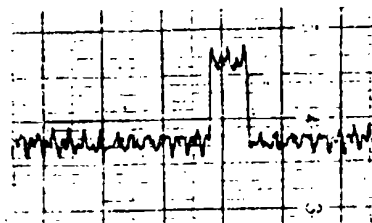
(b) 50% 甩负荷时
(记录仪输入电压为 1 V)



(c) 75% 甩负荷时
(记录仪输入电压为 500 mV)



(d) 100% 甩负荷时
(记录仪输入电压为 500 mV)



(e) 50 $\mu\epsilon$ 标定值
(记录仪输入电压为 500 mV)

图 13 动态测试曲线

$$2.5 \times \frac{50}{8.5} = 14.71 \text{ } \mu\epsilon \times \frac{2.1 \times 10^5}{10^6} = 3.09 \text{ MPa}$$

5 综合分析及结论

5.1 岔管实际受力分析

(1) 对岔管的有限元分析,是考虑了外包混凝土自重作用后得出的计算结果,这样比较切合岔管的实际受力情况¹⁹。分析结果表明:最大环向拉应力为 50 MPa(在 A 5 点附近),最大纵向拉应力为 37.7 MPa(在 D 5 点附近),这说明岔管受力不大¹⁹。

(2) 为便于分析对比,岔管的有限元分析部分应取不考虑外包混凝土自重作用的计算结果与静态实测值比较¹⁹。关键点进行对比结果见表 5¹⁹。

从表 5 可以看出,理论计算值和实测值比较吻合,但也有些点相差较大,甚至出现“+”、“-”号相反的情况¹⁹。但总的来说其误差在 20%以内,实测值比理论计算值偏大¹⁹。

(3) 实际上岔管受力应为实测应力和退火后焊接残余应力的叠加¹⁹。从设计和工作状态角度考虑,只须以最大应力点来进行控制¹⁹。各种情况应力组合后的数据见表 6,以进行校核¹⁹。

表 5 理论分析计算与静态测试值的比较 (MPa)

静态测试相应点位	理论值	实测值
A 20	51	54
A 39	32.08	46
B 40	35.95	34
B 11	11.09	13
B 51	11.90	14
C 20	33	36
C 70	20	15
C 41	20	17
D 10	14.55	71
D 30	27	15
B 20	13.9	13
B 50	19.1	23
B 71	21	-17
B 91	20	-9

表 6 静态测试工作应力、退火后实测焊接残余应力最不利组合结果 MPa

测点号	静态实测工作应力	实测退火后焊接残余应力	叠加值
A 20	54	50	104
A 40	14	44	59
C 1	89.9	<58	<147.9

A 20 点叠加应力为 104 MPa;C 1 点叠加应力≤147.9 MPa;两者皆大大低于 16 锰钢的屈服极限 350 MPa¹⁹。

5.2 发电机组甩负荷时的动力系数

动态测试数据表明:当 1[#]机组 100%甩负荷运行时,岔管内水压增加 33%,但岔管内应力只增加 4.4%,这是因为岔管外后浇混凝土结硬过程中在混凝土和管壁间会存在一定程度的“空隙”,钢岔管在静水压力作用下使钢管壁产生变形将“空隙”填满,在机组甩负荷时,对管壁应力带来的冲击系数仅为 1.05 左右,故设计岔管时可考虑这一有利因素¹⁹。

5.3 结 论

本次对岔管在实际工作状态下的应力分析的测试结果表明:

- (1) 现有钢岔管工作正常且安全可靠;
- (2) 按裸露状态且只受静水压力作用的现有设计过于保守, 因为实际上岔管是在埋入土体且有外包混凝土作用的情况下受力, 和设计假定相差甚远;
- (3) 在设计时过多地考虑了焊接应力的影响¹⁹.若能采用较薄的钢板焊接时还可在工艺上减小焊缝处的焊接应力;
- (4) 设计时过大地估计了机组甩负荷的水锤作用, 测试结果表明其冲击系数为 1.05;
- (5) 综上所述: 钢岔管的设计有着很大的潜力, 若按我们分析和测试结果进行设计, 引水系统钢岔管的投资可以节省 30% 以上¹⁹.

参 考 文 献

- 1 G·Swoboda¹⁹ Finite element analysis program system FINAL, Innsbruck Univercity, 1993
- 2 王勖成、邵敏¹⁹ 有限单元法基本原理与数值方法¹⁹. 北京: 清华大学出版社, 1985

Stress Analyses of Steel Branch for Water Power Station Diversion System under Action of Dynamic Water Pressure and Tests

Huang Ziyun¹ Lei Xiaoyan¹ Lu Yizhuang¹ Song Jinwei²
Yuan Zhihua¹ Wang Zeyuan¹ Yu hegeng¹

(¹ Civil Engineering Department ² Mechanical Engineering Department)

Abstract At present, the key region of water power station diversion system in our country, the design and manufacture of steel branch, usually adopt traditional analysis method and construction technology. In the case of inaccurately measuring eliminated welding stress, the finite element computations are used to analyze naked steel branch, which are often compared with test data of small size model. In order to investigate the actual stress distribution of steel branch on work service, we performed finite element computation, welding stress analyses and made tests on the site of the steel branch under running of power machine No. 1 for Jiangxi Dongjin Water Power Station Diversion System in September, 1995. The computation and test results show that the present design has great potentialities. If we make some modifications for the design, We can reduce the cost greatly and achieve high efficiency.

Key words diversion system; steel branch; stress analyses; stress test