

# 高水头扬水工程岔管应力分析

张军, 吴俊杰, 刘峰

(新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 针对克拉玛依市绿化扬水工程压力水头高、贴边岔管主管与支管垂直且连接处产生应力集中问题, 通过有限元对贴边岔管进行应力计算分析。计算结果表明: 1<sup>#</sup>贴边岔管通过增加管壁厚度而不施加补强板的方式可满足应力要求, 采用 Q345C 钢材, 管壁厚为 18 mm; 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>贴边岔管均可通过单层外贴补强板方式满足应力要求, 采用 Q390C 钢材, 主管、支管及补强板厚度 28 mm, 补强板宽度 500 mm。分析结果证明: 各贴边岔管单元开孔越大, 则主管缺失部分越多, 导致主、支管补强板夹角处的应力集中也越大。同时, 补强板焊缝处应力也较大而管壁应力较小, 通过提高焊缝施工质量, 尽量避免产生局部过大拉应力。计算分析结果可为供水工程的安全运行提供参考。为了节省工程投资, 可考虑相应主管与其支管建立整体有限元模型联合受力计算, 进一步优化贴边岔管结构和布置形式。

**关键词:** 高水头贴边岔管; 补强板; 应力分析; 绿化扬水工程

中图分类号: TV732.4<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0176-06

## Stress analysis of bifurcated pipes in a high head pumping project

ZHANG Jun, WU Junjie, LIU Feng

(Xinjiang Investigation, Design and Research Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** In a pumping project of landscaping in the downtown area of Karamay, the welded bifurcated pipes are stressed with high water head, and the main pipes and the branch pipes of them are vertically connected leading to the stress concentration at the joints. In order to solve this problem, we calculated and analyzed the stress using a finite element method. The calculation results show that the Q345C steel and 18 mm wall thickness adopted in 1<sup>#</sup> welded bifurcated pipe unit met the stress requirements with the increased wall thickness without the reinforcement of a reinforcing plate, whereas both 2<sup>#</sup> and 3<sup>#</sup> welded bifurcated pipe units needed the weld of an external single-layer reinforcing plate to meet the stress requirements with the adoption of Q390C steel. The thickness of the main pipes, branch pipes and the reinforcing plate is 28 mm, and the width of the reinforcing plate is 500 mm in these two units. The analysis results indicate that the larger the opening of the branch pipes in each unit are, the less integrated the main pipe is, which leads to the stress concentration at the angle between the reinforcing plates of the main and branch pipes. Meanwhile, because the stress at the weld of the reinforcing plates connecting the main and branch pipes is also large, whereas the stress on the pipe wall is relatively low, it is suggested to improve the quality of the welding as much as possible to avoid local excessive tensile stress. The calculation analysis results can provide some reference for the safe operation of the water supply system project. In order to reduce the construction cost, further calculations should be conducted on the integrated finite element model of the corresponding main pipes and their branch pipes to further optimize the structure and layout of the welded bifurcated pipes.

**Key words:** welded bifurcated pipes of high head; reinforcing plate; stress analysis; pumping project of landscaping

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2020-02-09

基金项目: 新疆天山英才第二期第二层次培养计划项目; 新疆天山青年计划项目 (QN2016BS0753)

作者简介: 张军 (1981-), 男, 四川资中人, 博士, 高级工程师, 注册土木工程师 (水工结构), 研究方向为水利水电工程设计及工程泥沙处理。

## 1 研究背景

压力管道是泵站扬水工程中重要的输水建筑物,而岔管的安全是泵房后期长期稳定运行的关键。考虑流态、水头损失、受力条件及施工制作工艺等条件,贴边岔管和月牙肋岔管应用较为广泛<sup>[1-3]</sup>。由于岔管的重要性及受力条件的复杂性,常采用有限元法进行计算<sup>[3-8]</sup>。目前,贴边岔管常用于中、低水头的中、小管径压力管道<sup>[9-11]</sup>,翟明杰等<sup>[9]</sup>运用有限元弹性模型对最大0.9 MPa水压力单支管径比为0.47的垂直贴边岔管进行计算,确定了合理补强板尺寸;郝永志<sup>[10]</sup>采用弹性模型对最大1.89 MPa水压力单支管径比为0.52的60°贴边岔管进行有限元分析,得出分岔角处应力最大,以此确定补强板尺寸;吴俊杰等<sup>[7,11]</sup>运用有限元弹性模型对最大1.63 MPa水压力单支管径比为0.2的垂直贴边岔管进行计算,得出以分岔角处控制应力确定补强板厚度和宽度。月牙肋岔管主要用于中、高水头、大管径压力管道<sup>[12-16]</sup>。根据规范规定,贴边岔管支管与主管的管径比 $d/D = 0.5 \sim 0.7$ ,夹角在45°~60°之间<sup>[17]</sup>,而本工程的贴边岔管单元主管与支管夹角垂直,且贴边岔管与主管的管径比 $d/D = 0.330 \sim 0.714$ ,这些特征值均超规范,仅用常规公式计算的结果不能保证工程运行安全。同时,本工程贴边岔管压力水头高,最高水压力为3.5 MPa;支管间距小、数目多,支管数目多为3~6根;主管开孔多且大,主、支管连接处产生应力集中,主支管垂直,且主支管的管径比小,对管道运行安全不利。以往主要针对中、低水头单根贴边岔管进行有限元弹性模型计算,对高水头多根贴边岔管的有限元计算较少,本工程通过整体有限元弹性计算使得高水头岔管中最不利支管的应力满足要求,再逐级量化每个岔口应力,系统地得出了本次岔管单元中每个支管在运行时期所处应力状态,为扬水工程的安全运行提供参考。

## 2 工程概况

克拉玛依市绿化扬水工程引水流量 $Q = 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,布置7台水泵,单台泵扬水流量 $Q = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ;设计扬程 $H = 180 \text{ m}$ 。进水侧主管管径 $D_{\text{进}} = 2.4 \text{ m}$ ,14根支管管径 $d_{\text{进}} = 0.8 \text{ m}$ ,支管最小间距为0.6 m;出水侧主管管径 $D_{\text{出}} = 1.4 \text{ m}$ ,7根支管管径 $d_{\text{出}} = 0.7 \text{ m}$ ,5根支管管径 $d_{\text{出}} = 1.0 \text{ m}$ ,支管最小间距为1.4 m;过滤器出水侧主管管径 $D_{\text{过}} = 1.4 \text{ m}$ ,5根支管管径 $d_{\text{过}} = 1.0 \text{ m}$ ,支管最小间距为2.0 m;进

水侧和出水侧取典型岔管单元进行有限元计算分析,岔管单元具体布置如图1所示。

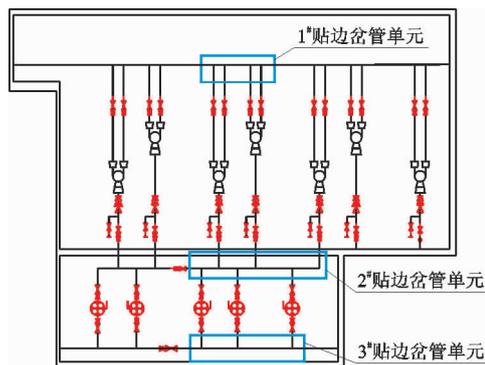


图1 贴边岔管单元平面布置图

## 3 研究方法

### 3.1 计算荷载工况及参数

岔管计算荷载工况以设计内水压力(含水锤)为运行工况(设计工况),水压试验内水压力为试验工况(校核工况)。1#贴边钢岔管设计内水压力为0.3 MPa,水压试验内水压力为0.375 MPa;2#、3#贴边钢岔管设计内水压力(含水锤)为2.8 MPa;水压试验内水压力为3.5 MPa。

1#岔管拟选用Q345C钢材,2#、3#岔管拟选用Q390C钢材。由于1#钢岔管压力较小,且受施工条件限制,拟采用不贴边方案,初步计算主、支管壁厚为18 mm,直接开洞焊接。2#岔管初步计算①支管~③支管补强板宽度 $B = 400 \text{ mm}$ ,④支管~⑥支管补强板宽度 $B = 500 \text{ mm}$ ,主、支管壁厚 $t = 28 \text{ mm}$ 。3#岔管初步计算①支管~③支管补强板宽度 $B = 500 \text{ mm}$ ,主、支管壁厚 $t = 28 \text{ mm}$ 。依据初拟壁厚和《水电站压力钢管设计规范》(SL281-2003)条文说明中的表12<sup>[17]</sup>,Q345C钢屈服强度为325 MPa,Q390C钢屈服强度为370 MPa。由于贴边岔管施工难度较大,焊缝施工采用单面焊接,焊缝系数取0.9。依据《水电站压力钢管设计规范》(SL281-2003)中4.1.6条、表6.1.1及表7.2.2<sup>[17]</sup>,钢材材料本构采用线弹性模型,其特性参数见表1;采用第四强度理论准则(即Mises应力)进行校核,不同工况的允许应力见表2。

表1 钢材材料计算特性参数

弹性模量/ MPa	泊松比	线膨胀 系数/℃	比重/ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-3}$ )
$2.06 \times 10^5$	0.3	$1.2 \times 10^{-5}$	$78.5 \times 10^{-5}$

表2 不同工况钢材允许应力值 MPa

钢材种类	应力类型	MPa	
		运行工况	试验工况
Q345C	整体膜应力	146.25	204.75
	局部膜应力	195.98	234.00
	局部膜应力+弯曲应力	234.00	292.50
Q390C	整体膜应力	154.35	216.09
	局部膜应力	206.83	246.96
	局部膜应力+弯曲应力	246.96	308.70

### 3.2 计算模型

本工程贴边岔管单元计算三维模型通过 Autodesk REVIT 建立<sup>[18]</sup>, 再将三维模型导入 ABAQUS 有限元计算软件, 对初拟壁厚和不同工况压力的岔管单元受力基于弹性力学的板壳理论进行分析, 主、支管计算边界条件和约束条件取管径的 2 倍和固端全约束<sup>[10,19]</sup>, 即无轴线位移。内荷载为面力压力作用在钢岔管内壁。网格剖分为四边形超曲

面壳单元, 1<sup>#</sup>钢岔管结点总数为 10 168, 单元总数为 3 336; 2<sup>#</sup>钢岔管结点总数为 22 366, 单元总数为 12 484; 3<sup>#</sup>钢岔管结点总数为 11 746, 单元总数为 8 484。岔管平面结构应力控制点分布见图 2, 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>贴边岔管划分网格后的有限元模型见图 3。

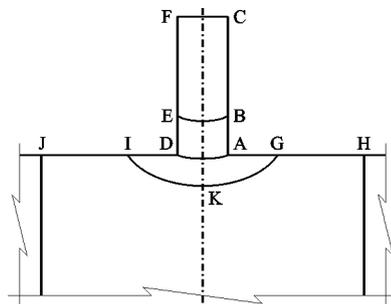


图2 岔管平面结构应力控制点分布

## 4 结果与分析

### 4.1 应力计算结果

1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>贴边岔管单元运行工况及试验工况应力计算结果见表 3 和 4, 应力云图见图 4~6。

表3 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>贴边岔管单元运行工况应力计算结果

MPa

贴边岔管单元	主、支管壁厚/mm	外贴补强板宽度/mm	支管编号	控制点										
				A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1 <sup>#</sup>	18	不贴	①	181.74	13.33	10.68	174.62	13.20	10.38	34.33	30.20	27.60	26.47	33.16
			②	179.36	12.17	9.01	173.39	12.33	9.63	33.23	29.02	26.37	25.37	32.04
			③	178.69	11.59	8.99	172.96	11.77	8.80	32.74	28.43	25.86	24.06	31.46
			④	177.87	10.43	7.56	171.42	10.50	7.72	31.63	27.10	24.53	23.85	30.12
2 <sup>#</sup>	28	400	①	185.14	24.98	30.82	187.98	25.19	48.75	63.71	74.12	26.14	26.14	185.04
		400	②	178.08	26.89	28.79	190.03	27.07	47.81	61.56	74.20	28.79	28.79	184.11
		400	③	175.43	26.95	30.44	185.75	27.18	47.21	61.83	70.19	27.96	27.96	182.84
		500	④	219.33	46.26	50.52	214.09	45.88	58.63	45.68	61.92	79.64	79.64	181.46
		500	⑤	216.83	45.84	46.56	218.67	46.12	59.79	46.06	62.79	81.92	81.92	183.15
		500	⑥	220.32	45.94	50.63	215.74	45.90	60.22	48.00	66.72	81.32	81.32	179.69
3 <sup>#</sup>	28	500	①	218.92	45.63	52.40	213.84	45.23	60.46	48.66	67.11	76.56	76.56	190.21
		500	②	213.10	45.11	48.98	218.79	45.43	60.49	49.20	70.22	83.35	83.35	189.16
		500	③	220.05	46.30	50.32	215.62	45.86	60.06	46.91	68.95	79.61	79.61	184.55

对表 3、4 及图 4~6 的应力计算结果分析如下:

(1) 1<sup>#</sup>贴边岔管单元主、支管壁厚  $t = 18$  mm, 其运行及试验工况的岔管单元所有控制点应力均小于允许应力, 满足规范和设计施工要求。1<sup>#</sup>贴边岔管中①支管~④支管与主管之间的关键点应力依次减小, ①支管与主管相交的焊缝处 A 点应力最大, 分析结果表明: 由于①支管距离变径处最近, 4 个支管中越靠近变径处

管壁应力越大。1<sup>#</sup>贴边岔管通过增加管壁厚度提高支管与主管段的刚度, 不施加补强板从而达到较低施工难度的方案是合理可行的。

(2) 2<sup>#</sup>贴边岔管主管壁厚  $t = 28$  mm, ①支管~③支管补强板  $B = 400$  mm, 采用外贴形式, ④支管~⑥支管补强板  $B = 500$  mm, 采用一层外贴形式, 支管管壁及补强板厚  $t = 28$  mm, 贴边岔管单元运行及试验工况的

管壁所有关键点应力小于允许应力,管壁相关线处的应力满足规范要求,满足设计要求。2#贴边岔管中①支管~⑥支管中,⑥支管与主管相交的焊缝处 A 点应力最大,该支管受力最不利,只需保证⑥支管应力能够满足规范要求即可。分析结果表明:由于①支管、②支

管、④支管、⑤支管间距较小,补强板无形中加大了该管段的刚度,③支管、⑥支管相对独立且⑥支管开口最大,导致应力最大。为了便于材料采购及施工制作,2#贴边岔管主管、支管壁厚  $t = 28 \text{ mm}$ ,补强板采用一层外贴,宽度  $B$  均为  $500 \text{ mm}$ ,厚度同管壁厚度。

表 4 1#、2#、3#贴边岔管单元试验工况应力计算结果

MPa

贴边岔管单元	主、支管壁厚/mm	外贴补强板宽度/mm	支管编号	控制点										
				A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1#	18	不贴	①	193.98	14.86	10.02	186.12	14.70	10.98	44.55	35.82	24.38	24.38	36.49
			②	192.46	13.10	9.69	185.43	13.27	9.71	43.21	34.29	23.27	23.27	35.36
			③	191.45	12.46	8.49	184.83	12.78	8.84	42.68	33.35	22.22	22.63	34.45
			④	190.76	11.95	7.12	183.61	11.40	7.76	41.52	32.96	21.85	21.56	33.56
2#	28	400	①	209.87	28.87	35.48	213.03	29.10	35.84	75.33	87.43	75.22	215.09	
		400	②	201.98	31.23	33.31	215.38	31.34	37.18	72.23	86.35	73.18	214.16	
		400	③	199.14	31.37	35.15	210.38	31.62	36.70	72.50	81.83	75.23	212.70	
		500	④	248.96	53.16	58.08	243.12	52.80	53.56	54.37	73.03	56.13	213.90	
		500	⑤	246.36	52.72	53.87	248.17	53.02	57.90	54.69	73.83	54.29	215.59	
		500	⑥	249.92	52.81	58.18	244.91	52.80	60.35	56.84	78.89	56.30	212.05	
3#	28	500	①	248.32	52.42	60.25	242.99	52.02	56.05	57.62	79.19	57.76	223.89	
		500	②	242.07	51.89	56.25	248.18	52.20	56.80	58.09	82.26	57.79	222.74	
		500	③	249.73	53.25	57.80	244.86	52.76	56.99	55.54	81.00	56.84	217.76	

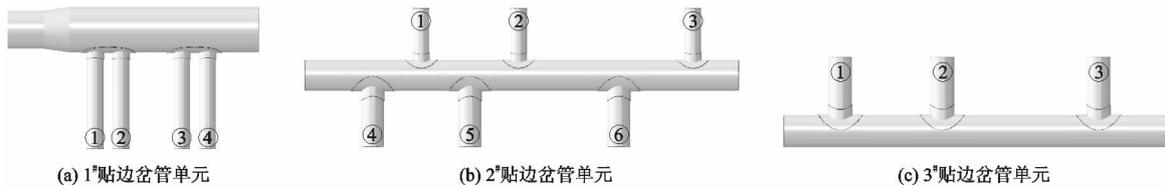


图 3 划分网格后的有限元模型

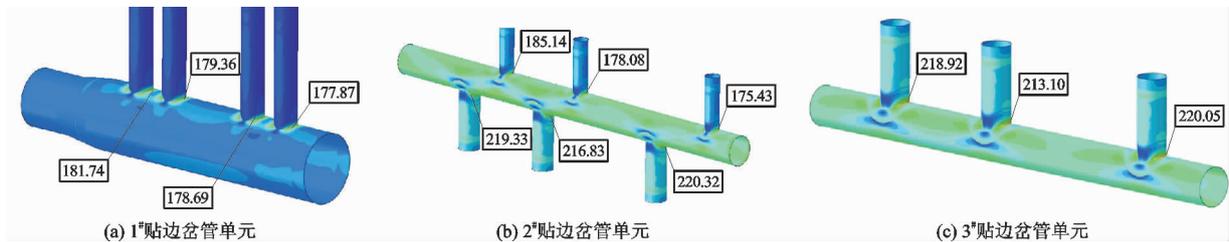


图 4 1#、2#、3#贴边岔管运行工况应力云图(单位:MPa)

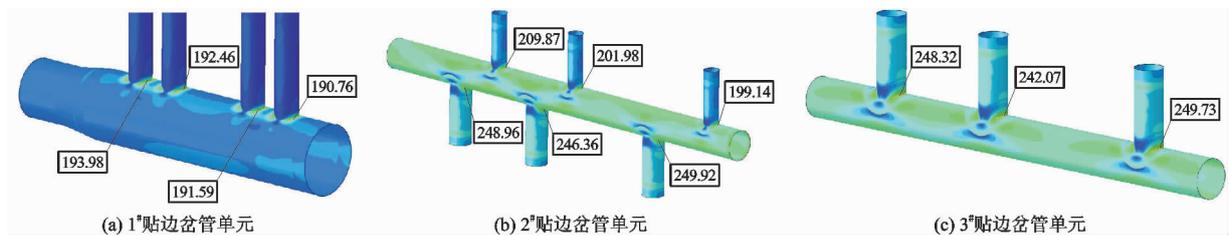


图 5 1#、2#、3#贴边岔管试验工况应力云图(单位:MPa)

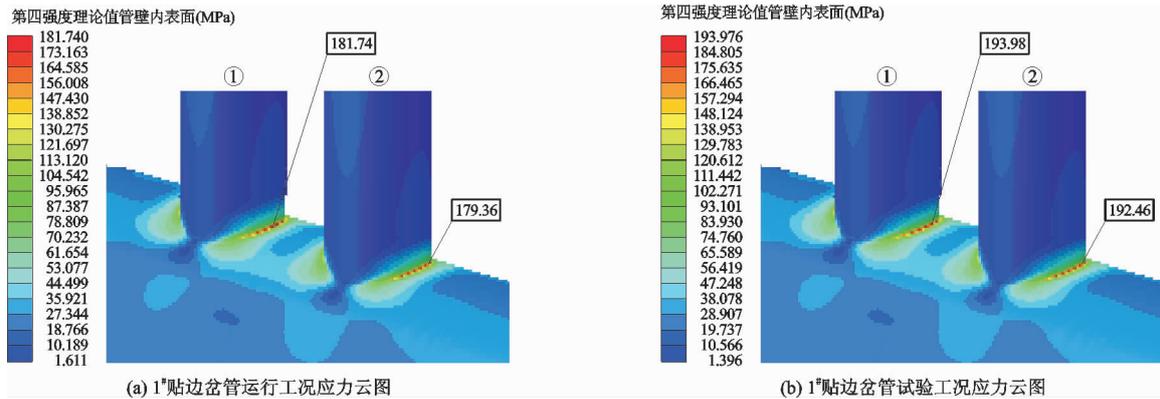


图6 1#贴边岔管单元不同工况局部应力云图

(3) 3#贴边岔管主、支管壁厚  $t = 28$  mm, ①支管~③支管补强板宽度  $B = 500$  mm, 采用一层外贴形式, 补强板厚  $t = 28$  mm, 贴边岔管单元运行及试验工况的管壁所有关键点应力小于允许应力, 满足规范和设计要求。在3#贴边岔管单元中①支管~③支管中, ③支管与主管相交的焊缝处A点应力最大, 该支管受力最不利, 只需保证③支管应力能够满足规范要求即可。分析结果表明: 由于①支管、②支管间距较小, 仅为2000 mm, 补强板无形中加大了该管段的刚度, ③支管相对独立导致应力最大。3#贴边岔管单元主、支管壁厚  $t = 28$  mm, 补强板宽度  $B = 500$  mm, 采用一层外贴形式, 补强板厚  $t = 28$  mm, 满足设计施工及规范要求。

#### 4.2 有限元分析

由表3和图4可以看出, 在运行工况时, 管壁各点的应力均满足规范要求。由于开孔越大, 主管缺失部分越多, 就会导致主、支管补强板夹角处应力越集中且应力越大。通过计算得出岔管单元中应力最大的支管, 使其应力满足要求, 再逐级量化每个岔口应力, 系统地得出了贴边岔管单元中每个钢岔管在运行时期所处应力状态, 为供水工程的安全运行提供保证。

由表4和图5、6可以看出, 在试验工况时管壁各个点的应力均满足规范要求, 且尚有一定的安全储备空间。从表3、4中可以得出无论是运行工况还是试验工况, 补强板焊缝处A、D及K点应力均非常大, 管壁应力状态较低, 这是由于钢岔管补强板焊缝处属于变截面段, 管壁刚度差异明显, 当受水压力时局部范围形变量相同, 但是沿管壁厚度方向变形积分不一致导致K点的局部拉应力过大, 因此, 需要严格把关补强板与主、支管焊缝质量, 尽量避免局部拉应力过大。

## 5 讨论

通常, 采用有限元计算单根主管与支管的贴边岔管类型较多<sup>[7-11]</sup>, 这与工程布置有关。由图1可知, 进水侧主管与14根支管连接、出水侧主管管径与7根支管连接、过滤器出水侧主管管径与5根支管连接, 工程布置较复杂。吴俊杰等<sup>[7]</sup>采用有限元法分别对月牙肋岔管、贴边岔管单独布置和月牙肋岔管与贴边岔管联合布置进行计算分析, 受力最不利点位置均为支管与主管相交处, 但联合计算应力值较小。因此, 本工程贴边岔管均取相应主管与支管连接最多、支管间距最小的最不利单元进行有限元计算, 避免建立整体模型的复杂性, 简化了计算过程, 提高了设计效率, 但结果稍偏安全。为了以后类似工程计算模型的建立、节省投资及对比分析, 可分别将主管与单根支管、主管与小间距支管、主管与其全部支管建立整体有限元模型进行计算, 将计算结果进行对比分析, 提出最优计算模型, 提高计算效率。同时考虑其联合受力, 可优化主管、支管、补强板厚度, 甚至可能减小主管、支管镇墩结构尺寸和锚筋长度, 优化支管布置和泵房布置, 节省投资, 建议类似工程可进行整体岔管有限元计算。

## 6 结论

基于克拉玛依市绿化扬水工程压力水头高、贴边岔管主管与支管垂直且连接处产生应力集中的问题, 通过有限元对贴边岔管单元进行应力计算分析, 得出如下结论:

(1) 1#贴边岔管补强方式通过增加管壁厚度而不施加补强板以满足应力和施工要求, 确定为管壁厚18 mm的Q345C钢材。2#、3#贴边岔管补强方式通过单层外贴补强板满足应力要求, 确定主、支管采

用管壁厚 28 mm 的 Q390C 钢材,补强板为 500 mm 宽的等厚钢材。

(2)各贴边岔管开孔越大则主管缺失部分越多,就会导致主、支管补强板夹角处应力越集中且应力越大,同时,补强板焊缝处应力也较大,而管壁应力较低。应通过有限元计算使得岔单元中最不利钢岔管的应力满足要求且严格检查焊缝施工质量,尽量避免局部拉应力过大。

(3)为了节省工程投资,建议类似工程可将相应主管与其全部支管建立整体有限元模型进行计算,考虑其联合受力,进一步优化贴边岔管结构和布置形式。

#### 参考文献:

- [1] 王小军. 基于三维有限元的卜型月牙肋钢岔管设计及应力分析[J]. 水电能源科学,2016,34(3):98-100+107.
- [2] 佟剑杰,苏怀智,王锋,等. 有限元法在泵站钢岔管结构分析中的应用[J]. 人民黄河,2010,32(6):135-136+141.
- [3] 皇甫一泽,张俊发,陶磊. 对称Y型月牙肋钢岔管内压弹塑性分析[J]. 电网与清洁能源,2018,34(8):37-41.
- [4] 薛超. 基于Solidworks的三岔形岔管有限元分析及优化设计[J]. 水电能源科学,2019,37(7):74-77.
- [5] 陈刚. 新疆JBK水电站岔管有限元分析计算[J]. 水利科技与经济,2018,24(6):80-83.
- [6] 曹伟涛. 某水电站钢岔管ANSYS有限元分析[J]. 中国水运,2016,16(8):213-218.
- [7] 吴俊杰,李国英. 月牙肋钢岔管与贴边钢岔管联合受力有限元优化分析[J]. 水电能源科学,2018,36(4):110-112.
- [8] 苏凯,李聪安,伍鹤皋,等. 水电站月牙肋钢岔管研究进展综述[J]. 水利学报,2017,48(8):968-976.
- [9] 翟明杰,穆永梅,王东黎. 有限元法在贴边岔管结构分析中的应用[J]. 特种结构,2012,29(1):109-112.
- [10] 郝永志. 吉音水库贴边岔管有限元分析[J]. 西北水电,2016(1):39-42.
- [11] 吴俊杰. 高压联合受力钢岔管对旁通贴边钢岔管的受力影响计算分析[J]. 水利科技与经济,2019,25(2):28-33.
- [12] 张金斌,蒲楠楠. “卜”形月牙肋岔管在超高水头电站设计中的应用研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):153-158.
- [13] 郭宇,吴俊杰. 新疆布仑口超高水头钢岔管参数化设计及优化分析[J]. 水电能源科学,2019,37(4):96-99.
- [14] 张洪瑞,初宝刚,杨海红. 基于三维有限元的高水头大管径月牙肋岔管结构设计[J]. 水利水电技术,2015,46(4):64-68.
- [15] 雷娜. 某水电站高压钢岔管三维有限元计算[J]. 水科学与工程技术,2017(1):59-62.
- [16] 周彩荣,伍鹤皋,石长征. 埋藏式月牙肋钢岔管应力控制标准的比较研究[J]. 水力发电,2014,40(4):54-57.
- [17] 中华人民共和国水利部. 水电站压力钢管设计规范:SL281-2003[S]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [18] 韩守都,吴俊杰,王小军. 钢岔管三维参数化设计方法的研究与应用[J]. 水电能源科学,2015,33(3):175-178+174.
- [19] 陈艳,吴俊杰. 钢岔管三维参数化设计方法在ART工程中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(3):237-240.