

隔水管优化设计分析

胡林 黄激之 邓义林 张国兵 (重庆前卫科技集团有限公司, 重庆 401121)

摘要: 隔水管作为某装备的重要水下载体, 需承受 30MPa 外压, 同时要求具有可操作性。原隔水管有长短两种规格, 均采用钛合金 TA3 制造, 长规格的总重量约 10kg, 该重量给用户带来较大的操作难度。为提高隔水管的操作性能, 减轻重量, 需对该结构进行重量优化。本文利用商业分析软件 ANSYS-Workbench 搭建了优化设计平台, 研究分析了结构尺寸、刚强度及重量的相互关系, 得到了隔水管的最优结构尺寸。

关键词: 隔水管; 重量; Workbench; 优化设计

0 引言

隔水管作为某装备的重要载体结构, 其工作水深达到 3000m, 结构需承受 30MPa 外压, 原隔水管有长 (410mm)、短 (360mm) 两种长度的规格, 均采用钛合金 TA3 制造, 材料特性见表 1, 壁厚为 14mm, 结构部分尺寸示意图如图 1 所示。

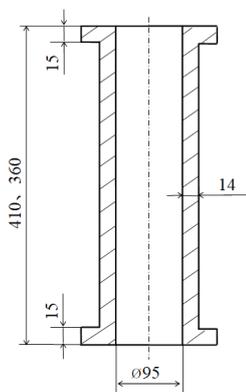


图 1 隔水管

表 1 材料特性表

| 名称 | 材质 | 牌号 | 密度 (g/cm ³) | 抗拉强度 (MPa) | 屈服极限 (MPa) | 弹性模量 (GPa) | 泊松比 |
|-----|-----|-----|-------------------------|------------|------------|------------|------|
| 隔水管 | 钛合金 | TA3 | 4.62 | 500 | 380 | 90.6 | 0.36 |

由于长隔水管前期设计未采用数字技术进行优化, 虽然其主要功能满足设计要求, 但重量给用户带来较大的操作难度, 长规格的隔水管重量高达 10kg, 为了得到较优的结构重量, 节约设计研发成本, 缩短优化周期, 本文采用成熟的商业分析软件 ANSYS-Workbench 对隔水管进行优化设计分析。

1 优化设计平台

优化分析时需充分考虑结构的相关性, 选取必要结构尺寸作为优化设计的设计目标和变量, 对相应几何尺寸进行参数化设置。另外, 根据原隔水管结构特点和使用环境, 隔水管结构需满足一定的设计强度和刚度, 因此需提取其结构强度和刚度作为优化设计中的设计约束。最后, ANSYS-Workbench 中有两种主要的优化形式, 一种是直接优化分析, 另一种是响应面优化分析, 一般

来讲, 直接优化分析需耗费较大的计算资源, 而且无法对设计提供较好的建议, 而响应面优化分析有更好的优化速度和优化效果, 因此本文选择响应面优化分析方法。最终搭建设计优化平台如图 2 所示。

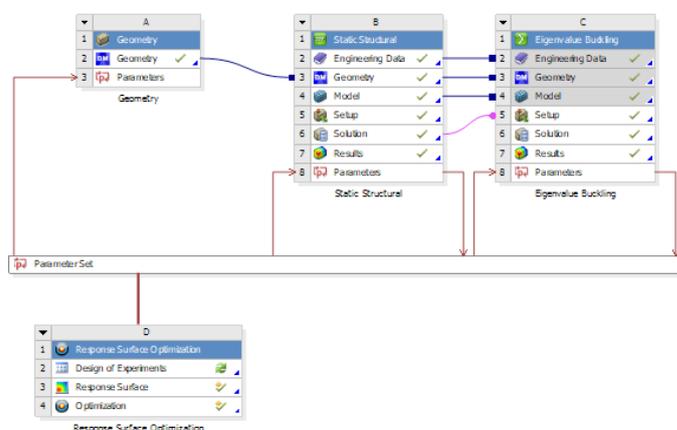


图 2 优化设计平台

2 分析设置

2.1 DOE 分析设置

DOE 分析即试验设计分析, 是响应面分析的前提, 对响应面分析进度有着较大的影响, 合理的 DOE 分析可以极大的减少实验次数, 缩短周期, 最终提高经济效益。图 3 为 DOE 分析设置界面, 在板块 D 中设置样本点选取方法为 CCD (Central Composite Design), 产生出一系列 DOE 实验设计点, 样本点分布参看图 6。

| A | | B | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Property | Value | Property | Value |
| Design of Experiments | Enabled | Design Points | |
| Input Parameters | | Preserve Design Points After DX Run | |
| Geometry (A:1) | | Failed Design Points Management | |
| P12 - H_height | <input checked="" type="checkbox"/> | Number of Retries | 0 |
| P13 - T_thickness | <input checked="" type="checkbox"/> | Design of Experiments | |
| Output Parameters | | Design of Experiments Type | Central Composite Design |
| Static Structural (B:1) | | Design Type | Face-Centered |
| P7 - Equivalent Stress Maximum | | Template Type | Standard |
| P14 - Geometry Mass | | Design Point Report | |
| Eigenvalue Buckling (C:1) | | Report Image | None |
| P9 - Total Deformation 2 Load Multiplier | | | |
| Charts | | | |
| Parameters Parallel | <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Design Points vs Parameter | <input checked="" type="checkbox"/> | | |

图 3 DOE 基本设置

2.2 响应面分析设置

响应面分析是利用合理的实验设计方法并通过实验得到一定数据, 采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的关系, 通过对回归方程的分析来寻求最优工艺参数, 是解决多变量问题的一种统计方法。图 4 为响

应面分析基本设置，响应面分析类型选择 Full 2nd-Order Polynomials。

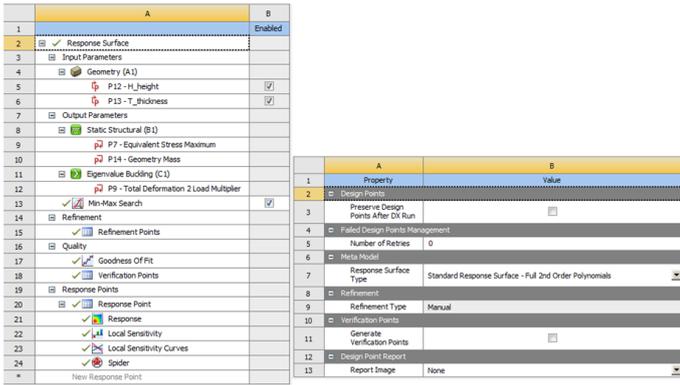


图 4 响应面分析基本设置

2.3 优化分析设置

优化分析一般分直接优化分析和响应面优化分析，响应面分析效果较大程度上取决于响应面分析精度，本文采用响应面的优化分析方法，图 5 为优化设计基本设置，其中主要设置 P7 变量（vonMises 强度）和 P9 变量（屈曲强度）为约束条件，P12 变量（长度）为定值，P13 变量（厚度）为设计目标，P14 变量（重量）为设计目标，选择 MOGA 多目标优化算法。

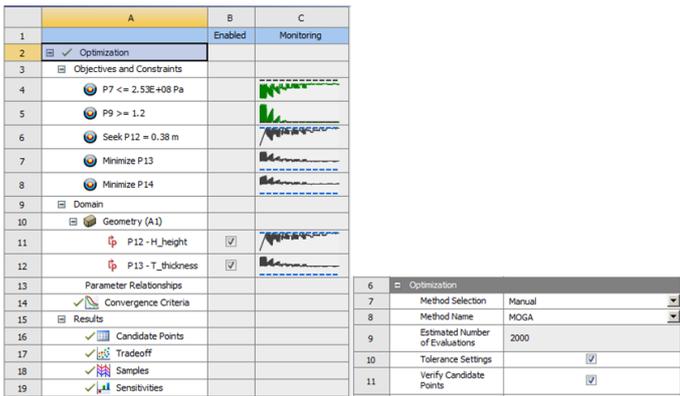


图 5 优化设计基本设置

3 分析结果

3.1 DOE 分析结果

图 6 为 DOE 样本点及分析结果，由图可知 CCD 根据高度和厚度的范围生成了 9 个样本点。设计目标质量变化范围在 5.0kg-10.0kg 之间，最大 vonMises 应力在 11.3e8Pa-2.3e8Pa 之间，屈曲强度因子约在 1.3-15.7 之间变化。

| | A | B | C | D | E | F |
|----|-------|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|
| 1 | Name | P12 - H_height (m) | P13 - T_thickness (m) | P7 - Equivalent Stress Maximum (Pa) | P9 - Total Deformation 2 Load Multiplier | P14 - Geometry Mass (kg) |
| 2 | 1 | 0.355 | 0.01025 | 1.6098E+08 | 6.6731 | 7.1578 |
| 3 | 2 | 0.35 | 0.01025 | 1.6098E+08 | 6.6755 | 6.7664 |
| 4 | 3 | 0.38 | 0.01025 | 1.6098E+08 | 6.5137 | 7.5493 |
| 5 | 4 | 0.355 | 0.0065 | 2.3051E+08 | 1.4224 | 4.9986 |
| 6 | 5 | 0.355 | 0.014 | 1.2863E+08 | 15.666 | 9.462 |
| 7 | 6 DP1 | 0.33 | 0.0065 | 2.3051E+08 | 1.5353 | 4.7592 |
| 8 | 7 DP2 | 0.38 | 0.0065 | 2.3051E+08 | 1.3358 | 5.238 |
| 9 | 8 DP3 | 0.33 | 0.014 | 1.2863E+08 | 15.961 | 8.9082 |
| 10 | 9 DP4 | 0.38 | 0.014 | 1.2863E+08 | 15.426 | 10.016 |

图 6 DOE 样本点及分析结果

3.2 响应面分析结果

图 7 为响应面云图，该图说明该结构最大 vonMises 应力随壁厚的减小和高度的增加而增大，而一阶屈曲特

征因子随壁厚的减小和高度的增加而减少。

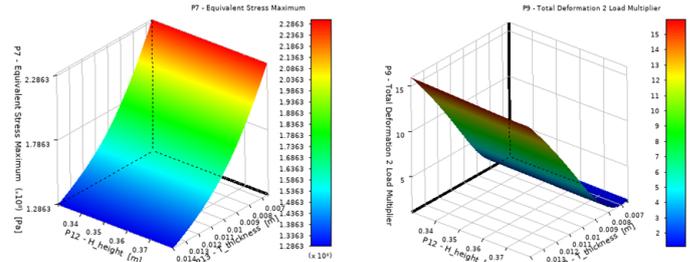


图 7 响应面云图

图 8 为灵敏性直方图，该图说明隔水管壁厚对自身 vonMises 强度、屈曲强度和结构重量敏感性较高，在边界条件和载荷一定的条件下，随着厚度的增加，结构强度越好，刚度越高，但重量也在急剧增加。而隔水管长度对自身 vonMises 强度、屈曲强度和结构重量敏感性较低，对自身强度的敏感性最低，其次是刚度，最后是重量。

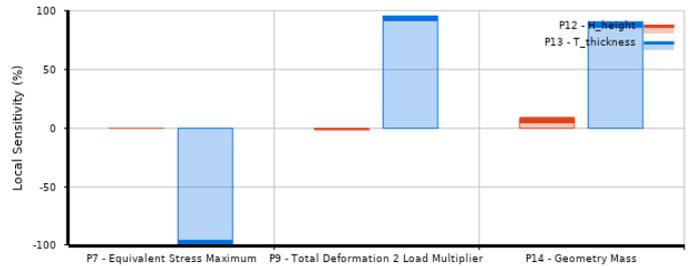


图 8 灵敏度直方图

3.3 优化分析结果

图 9 为优化分析结果，图中给出了 3 种优化建议及结果，并通过回归计算，获得了设计约束变量的真实仿真数值，可以看出优化算法得到的预测值与仿真值非常接近，误差较小。因此优化分析可以在较少的计算资源使用下，快速准确的给出具有指导意义的预测值。

| | | |
|----|-------------------------------------|---|
| 3 | Minimize P13 | Goal, Minimize P13 (Default importance) |
| 4 | Minimize P14 | Goal, Minimize P14 (Default importance) |
| 5 | P7 <= 2.53E+08 Pa | Strict Constraint, P7 values less than or equals to 2.53E+08 Pa (Default importance) |
| 6 | P9 >= 1.2 | Strict Constraint, P9 values greater than or equals to 1.2 (Default importance) |
| 7 | Optimization Method | |
| 8 | MOGA | The MOGA method (Multi-Objective Genetic Algorithm) is a variant of the popular NSGA-II (Non-dominated supports multiple objectives and constraints and aims at finding the global optimum. |
| 9 | Configuration | Generate 100 samples initially, 100 samples per iteration and find 3 candidates in a maximum of 20 iterat |
| 10 | Status | Converged after 900 evaluations. |
| 11 | Candidate Points | |
| 12 | | Candidate Point 1 Candidate Point 1 (verified) Candidate Point 2 Candidate P |
| 13 | P12 - H_height (m) | 0.37985 0.37966 |
| 14 | P13 - T_thickness (m) | 0.0066447 0.0065488 |
| 15 | P7 - Equivalent Stress Maximum (Pa) | 2.2703E+08 2.2669E+08 2.2933E+08 2.29 |

图 9 优化分析结果

3.4 强度分析结果

综合考虑优化分析结果及结构加工公差，最终选取壁厚 7mm 的隔水管，更新几何参数设计点，返回给几何模块，静力学模块，屈曲强度分析模块进行相应建模及分析，由于同厚度下短隔水管强度更优，因此本文只对优化后的长隔水管进行最终校核，分析结果见图 10。

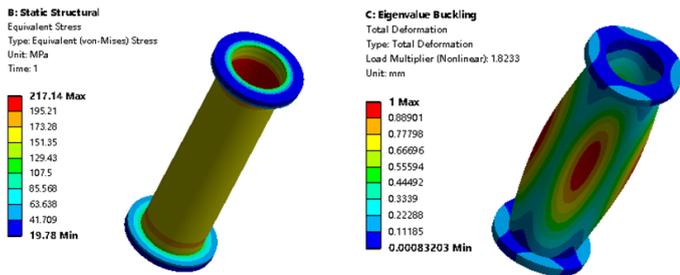


图 10 vonMises 云图 (左)、一阶屈曲云图 (右)

其中图 10 中 vonMises 云图 (左) 为静力学模块分析得到的 vonMises 强度分析结果, 该图说明, 隔水管在 30MPa 外水压下, 最高 vonMises 强度为 217.1MPa, 低于钛合金屈服强度, 其安全系数达 1.5。一阶屈曲云图 (右) 为屈曲模块分析得到的屈服强度分析结果, 该图说明, 隔水管在 30MPa 外水压下, 其第一阶屈曲系数为 1.8。



图 11 隔水管 (优化) 试验后状态图

3.5 试验分析结果

根据优化设计结果, 对结构进行改进加工, 使原壁厚减至 7mm, 采用压力釜对该结构进行加压试验验证, 试验结果见图 11, 经 30MPa 外水压试验后的改进型隔水管结构完整, 无明显缺陷, 满足设计要求。

4 结论

本文通过有限元优化分析得到结构最优尺寸, 充分的优化了原隔水管重量, 优化结构见表 2, 最后通过试验验证证明该优化结果可行。

表 2 隔水管优化结果

| 规格 | 优化前重量 (kg) | 优化后重量 (kg) | 减重比 |
|-----------|------------|------------|--------|
| 短 (360mm) | 8.908 | 5.019 | 43.65% |
| 长 (410mm) | 10.0 | 5.537 | 44.63% |

参考文献:

- [1] 闻邦椿. 机械设计手册: 第 6 卷 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [2] 张洪武, 等. 有限元分析与 CAE 技术基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] 陈黎明, 陈国明, 孙友义, 等. 深水钻井隔水管避台撤离动力和长度优化 [J]. 海洋工程, 2012.
- [4] 王进全, 王定亚. 国外海洋钻井隔水管与国产化研究建议 [J]. 石油机械, 2009.

作者简介:

胡林, 男, 汉族, 重庆人, 研究生, 力学专业, 中级工程师, 重庆前卫科技集团有限公司。

(上接第 158 页)

④进膜管道前端最高处安装高压自动进排气阀, 防止高压气体对膜表面形成水锤造成破坏;

⑤出膜浓水管道最高处安装高压自动进排气阀, 防止膜内气囊通过等压式能量回收装置形成闭环循环, 启停高压泵形成水锤造成膜表面破损、中心管破裂以及汽蚀增压泵;

⑥在产水管道侧单向阀前最高处安装自动进排气阀, 防止反渗透系统停机时形成真空, 自动协调反渗透设备内外压力, 消除反渗透膜浓差极化现象, 减少反渗透膜表面结垢条件。

表 1 不同工艺以及排气阀安装位置对反渗透膜的影响

| 序号 | 能量回收装置 | 排气阀安装 | RO 进水工况 | 膜运行年长 | 脱盐率 % |
|----|--------|-------|---------|-------|-------|
| 1 | 涡轮式 | 安装不规范 | 少量气囊 | 2 | 98.0 |
| 2 | 等压式 | 安装不规范 | 大量气囊 | 2 | 97.0 |
| 3 | 等压式 | 安装规范 | 无气囊 | 5 | 98.7 |

通过永兴岛海水淡化厂运行了 5 年的 3 套 500T/D 膜法海淡设备研究发现, 排气阀安装位置对反渗透膜稳定运行起着重要作用。表 1 为永兴岛 3 套海水淡化设备生产工艺及其脱盐率。

5 结论

在反渗透系统中, 排气阀成本微不足道, 却是整个反渗透系统安全运行必不可少的装置。工程实践证明, 不装或者排气阀安装不合理, 都可能造成爆管、反渗透膜表面破损、中心管爆裂, 造成一定程度的经济损失。为避免设备因汽蚀、水锤导致损坏, 排气阀的合理安装决定着反渗透系统后期运行的成本, 所以在反渗透系统的设计与施工过程中应引起足够重视, 在考虑反渗透系统的不同设备运行情况以及管道流体高压力的特殊性, 合理安装, 以达到预期设计的效果, 让反渗透系统充分发挥高效节能的效益。

参考文献:

- [1] 翁晓丹, 张希建, 张建中, 何钦雅, 余浩, 陈亮, 陶如钧. 我国反渗透海水淡化能量回收装置研究与应用现状 [J]. 中国给水排水, 2021, 37(04):11-15.
- [2] 靳卫华, 李志鹏, 秦武, 吴兴, 姚睿. 排气阀的结构特点与应用研究 [J]. 给水排水, 2008(07):112-115.