

文章编号:1007-7383(2008)02-0228-04

基于有限元分析的玻璃钢夹砂管优化设计

申继红,王辉明,石小雷,辛保卫

(1 新疆大学建筑工程学院,新疆乌鲁木齐 830008; 2 新疆永昌积水复合材料有限公司,新疆米泉 831400)

摘要: 为了使玻璃纤维缠绕增强热固性树脂夹砂压力管的设计更加安全、经济,本文探讨了在有限元分析基础上对该复合材料结构进行优化设计的理论和方法,运用 ANSYS 软件对某市政给排水工程中采用的玻璃钢夹砂顶管进行了结构优化设计分析,研究了影响该结构优化设计的主要因素,计算结果表明,按此优化设计方法进行设计可节省材料 25.2%。

关键词: 玻璃钢夹砂管; 优化设计; 有限元

中图分类号: TU392.3 **文献标识码:** A

随着我国综合实力和经济水平的不断提升,对市政工程等基础设施建设提出了更高的要求,因此大量的先进产品和技术被广泛应用于工程项目中。玻璃钢又称作玻璃纤维增强树脂材料。玻璃钢管道是由连续玻璃纤维、不饱和聚酯树脂和填料组成的新型复合材料管道。该产品主要采用计算机控制,以往复式定长缠绕方法成型,具有一系列优良的特性,是欧美等发达国家应用广泛的工业管材之一,并已制定了完善的管道产品标准和工程设计安装规范。20 世纪 50 年代中期问世的玻璃纤维缠绕夹砂管,是在玻璃钢管道制造过程中添加一层或几层树脂砂浆层,使整个管壁成为夹层结构,成功地解决了纯纤维缠绕玻璃钢管壁结构刚度和强度不匹配问题,提高了管道的刚度,有效地降低了制造成本,明显地提高了玻璃钢的竞争能力。40 多年的工程实践证明,玻璃钢夹砂管是一种使用寿命可达 50 年的节能环保产品,尤其在市政给水排水、各类污水收集和输送管线、农田灌溉引水管线、发电厂冷却水供水系统、油气污水混输系统等领域的应用越来越广泛,为用户创造了良好的经济效益和社会效益,我国也于 1998 年发布了管道产品标准和工程设计规范等建材行业标准^[1]。

传统的结构设计是设计者按照设计要求和设计者的实践经验,参考类似工程通过判断创造结构方案,然后进行强度、刚度、稳定性等各方面的力学分析或按规范要求作安全校核,再修改设计,这一过程

繁复,且往往只能创造出可行方案。结构优化设计是一种寻找确定最优设计方案的技术,是近 20 多年发展起来的、将数学的最优化理论结合计算机技术应用于结构设计的一种新型设计方法。它将力学概念和优化技术有机结合起来,根据设计要求使参与计算的量部分以变量形式出现,形成全部可能的结构设计方案域,利用数学手段在域中找出满足预定要求的,不仅可行而且最好的设计方案。实践证明,结构优化设计能缩短设计周期,提高设计质量和水平,从已有工程经验看,与传统设计相比,优化设计可以使土建工程降低造价 5% ~ 30%^[2]。因此,基于有限元分析的结构优化设计方法有巨大的优势和潜力,是工程技术人员十分恰当的选择。

1 玻璃钢夹砂管的结构与设计要

本文对某市政给排水工程中采用的某型号玻璃钢夹砂管进行分析研究,该玻璃钢夹砂管工程实施现场情况如图 1 所示。

该玻璃钢夹砂管以玻璃纤维无捻粗纱及其制品为增强材料,热固性树脂为基体,优质石英砂等为填料,采用计算机控制的往复式交叉缠绕工艺,玻璃纤维缠绕时保持适当的张力及缠绕速度,可以保证玻璃纤维在缠绕前被树脂浸透。

管壁层合结构由内衬层、玻璃纤维缠绕结构层、树脂夹砂层和外表面保护层组成。内衬层起防腐、防渗作用,结构层是管道承受荷载的主体,外保护层

收稿日期: 2008-01-25

作者简介: 申继红(1964-),女,教授,从事结构工程研究;e-mail: sjhxsj@yahoo.com.cn.

起抗老化、防腐蚀作用。

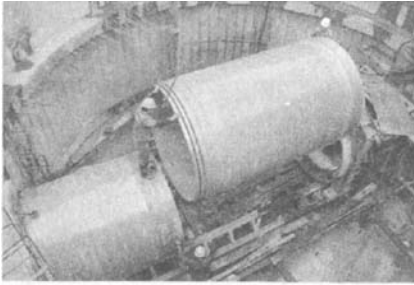


图1 玻璃钢平砂管施工现场

该玻璃钢夹砂管的设计要求如下:

标准件长度为6.0m,内径为1.0m;

·内衬层厚度 $\geq 1.8\text{mm}$;

管道压力等级0.6MPa,刚度等级 5000N/m^2 ;

最小环向拉伸强度为 2178kN/m^2 ,最小轴向拉伸强度为 340kN/m^2 ;

最大允许长期垂直挠曲变形量为3%,最大允许初始垂直挠曲变形量为2%;

本研究在保证该玻璃钢夹砂管满足强度、刚度和稳定性等各方面安全要求的前提下,通过优化设计使该玻璃钢夹砂管重量最轻,即最经济的问题。

2 基于有限元分析的玻璃钢夹砂管优化设计

2.1 结构优化设计的数学模型

在结构优化设计的数学表述中,主要涉及三大要素:设计变量(X)、目标函数(QBJ) $\Psi(X, Y)$ 和约束条件。

优化设计的主要过程为,首先寻找设计向量

$$X = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$$

和状态向量

$$Y = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m)^T,$$

使目标函数 $\Psi(X, Y)$ 最小,即求得 $\Psi(X, Y)_{\min}$,且满足状态方程:

$$f_k(X, Y) = 0, k = 1, 2, \dots, m; \quad (1)$$

约束方程:

$$g_j(X, Y) \leq 0, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

由此可知,优化问题本质上属数学规划范畴,且复杂的结构优化问题多属非线性规划。

对有限元分析中常见的线弹性静力问题,最基本的状态变量就是结点位移,即

$$Y = U, \quad (3)$$

结构在离散化后须满足的状态方程就是整个结构的

平衡方程^[3]:

$$KU = R, \quad (4)$$

即

$$f = KY - P = 0, \quad (5)$$

式(4)、(5)中, K 、 U 、 R 分别为修正后的整体刚度矩阵、结点位移列阵和载荷列阵。

针对设计点 $X^{(0)}$,通过有限元分析求出式(5)中的状态变量 $Y^{(0)}$,使设计变量产生微小的改变,移动到新设计点

$$X^{(1)} = X^{(0)} + \delta X^{(0)},$$

再通过有限元分析求出状态变量 $Y^{(1)}$,则结点位移状态变量的改变量为

$$\delta Y^{(0)} = Y^{(1)} - Y^{(0)}.$$

应力状态变量可由

$$\sigma = E\epsilon = EBU = EBY = DY$$

求出,其中 B 、 D 分别为应变、应力矩阵, E 为弹性矩阵。

由于在设计点 $X^{(0)}$ 及 $X^{(1)}$ 均满足状态方程(6),因此精确到一阶增量,有

$$\Delta f^{(0)} = \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^{(0)} \delta X^{(0)} + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^{(0)} \delta Y^{(0)} = 0, \quad (6)$$

可得结点位移增量

$$\delta Y^{(0)} = - (K^{-1})^{(0)} \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^{(0)} \delta X^{(0)}, \quad (7)$$

因此在 $X^{(0)}$ 的邻域,目标函数的一阶增量为:

$$\begin{aligned} \Delta \Psi^{(0)} &= \left(\frac{\partial \Psi}{\partial X}\right)^{(0)} \delta X^{(0)} + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y}\right)^{(0)} \delta Y^{(0)} = \\ & \left[\left(\frac{\partial \Psi}{\partial X}\right)^{(0)} - \left(\frac{\partial \Psi}{\partial X}\right)^{(0)} (K^{-1})^{(0)} \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^{(0)}\right] \delta X^{(0)}. \end{aligned} \quad (8)$$

根据 $\Delta \Psi$ 和约束方程(2)判断是否满足约束条件,如不满足,修正设计变量 $X^{(0)}$ 和步长 $\delta X^{(0)}$,再次进行迭代计算,因此整个优化过程是一个分析→评估→修正的循环过程,重复这一循环过程直到所有的设计要求都满足为止。

2.2 采用 ANSYS 进行玻璃钢夹砂管优化设计过程

本文通过有限元软件包 ANSYS 实现具体的优化设计过程。

与传统的优化设计类似,在利用 ANSYS 进行优化设计之前,先要确定问题的数学模型,即设计变量、约束条件及目标函数,所不同的是 ANSYS 的模型必须用参数化表示。

ANSYS 优化设计过程通常包括以下六个步骤^[4]:

1)生成循环所用的分析文件,该文件必须包括

整个有限元分析的过程,即必须满足以下条件:

参数化建立模型(PREP7),求解(SOLUTION),提取并指定状态变量和目标函数;

2)在 ANSYS 数据库中建立与分析文件中变量相对应的参数;

3)进入初始设计,指定分析文件;

4)声明优化变量,选择优化方法,指定优化循环控制方式;

5)进行优化分析;

6)查看设计序列结果(OPT)和后处理(POST1/POST26)。

2.2.1 玻璃钢夹砂管优化设计的有限元模型

采用空间有限元方法建立玻璃钢夹砂管力学模型(图 2),使用每个节点具有 6 个自由度的 8 节点层合壳单元 Shell99,该壳单元最多可支持 250 个不同材料层。



图 2 玻璃钢夹砂管有限元分析的力学模型

在本计算模型中分为 6 层:内衬层、环向缠绕层、交叉缠绕层、夹砂层、交叉缠绕层、环向缠绕层。玻璃钢夹砂管共划分为 2232 个节点和 720 个单元,内压强度为 0.6MPa,根据玻璃钢夹砂管在内压强度试验中的受力及变形特点,沿其纵向在水平和垂直剖面上施加对称约束条件。各组分材料的物理属性如下:

内衬层:基体部分视为各向同性材料,弹性模量为 6.74GPa,泊松比为 0.33。

环向缠绕层:视为横观各向同性材料,纵向弹性模量为 38GPa,横向弹性模量为 6.9GPa,纵向泊松比为 0.27,面内剪切弹性模量为 3.8GPa。

交叉缠绕层:视为横观各向同性材料,纵向弹性模量为 70GPa,横向弹性模量为 7.6GPa,纵向泊松比为 0.3,面内剪切弹性模量为 4.79GPa。

夹砂层:视为各向同性材料,弹性模量 6.4GPa,泊松比为 0.33。

2.2.2 玻璃钢夹砂管优化设计模型

考虑到产品规格及制作工艺要求,内衬层取符

合设计要求的确定值,不参与结构优化过程。因此主要的设计变量包括环向缠绕层厚度(DV1)、交叉缠绕层厚度(DV2)、夹砂层厚度(DV3)和交叉缠绕角(DV4)^[5]。所以,该问题的优化设计模型为:

设计变量:DV1, DV2, DV3, DV4;

目标函数(OBJ):结构的总体积为最小;

约束条件:环向缠绕层最大环向工作应力小于环向缠绕层材料环向抗拉强度,交叉缠绕层最大环向工作应力小于交叉缠绕层材料环向抗拉强度。

在 ANSYS 中的优化设计过程采用一阶方法,将目标函数的允许误差定为 0.05。随设计变量所取的初值不同,优化计算的迭代次数也有一定差异,但最终结果总使目标函数及设计变量收敛于确定值。优化前后结果比较见表 1。

表 1 玻璃钢夹砂管的优化设计结果

设计变量	设计变量含义	原设计值	优化设计值
DV1	环向缠绕层厚度/mm	0.82	0.16
DV2	交叉缠绕层厚度/mm	1.64	1.00
DV3	夹砂层厚度/mm	9.50	8.73
DV4	交叉缠绕角/°	54	54
OBJ	结构的体积/mm ³	50186858.6	37515691.7
	管刚度/N·m ⁻²	10325	8967
	挠曲水平/%	0.6	1.4

3 结论

1)对玻璃钢夹砂管,设 V_T 表示原设计所需结构层材料的总体积, V_O 表示结构经优化设计后所需结构层材料的总体积,则可节省材料 $\frac{V_T - V_O}{V_T} \times 100\% = 25.2\%$,因此产品成本可降低 25% 左右,并且设计结果满足管刚度和挠曲计算的要求。

2)在实际设计中,有时因尺寸的选择不可能完全符合优化的结果,但如果参照优化结果去选择,用相同数量的材料可以得到刚度较大的结构。这表明,优化设计能最合理地利用材料的性能,使结构内部各单元得到最好的协调,并具有规范所规定的安全度。同时,它还可对整体性方案设计进行合理的决策,因此,优化设计是实现设计的最终目标——适用、安全和经济的有效途径。

参考文献:

- [1] JC/T838-1998,玻璃纤维缠绕增强热固性树脂夹砂压力管[S].
- [2] 蔡新,郭兴文.工程结构优化设计[M].北京:中国水

利水电出版社,2003.

[M].西安:西北工大出版社,2000.

[3] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.

[5] 林柏生.缠绕玻璃钢管道轴向强度设计[J].玻璃钢/复合材料,1999,(1):7-8.

[4] 王国强.实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上实践

Glass Fiber Reinforced Mortar Pipe Optimization Design Based on Finite Element Analysis

SHEN Ji-hong, WANG Hui-ming, SHI Xiao-lei, XIN Bao-wei

(1 College of Architecture Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi, Xinjiang 830008, China;
2 Yongchang-Sekisui Composites Co. Ltd, Wulumuqi, Xinjiang 830008, China)

Abstract: For making the FWRPMP safe and economical, this paper discusses the theory and method on optimization design. By means of ANSYS, FWRPMP example was used to examine the efficiency of the approach, it saves 25.2% material. This method can be used as a reference in the engineering design.

Key words: glass fiber reinforced pipe; optimization design; finite element method (FEM)