

文章编号:1674-2869(2011)08-0099-04

多层复杂结构有限元应力分析方法

李智帅¹, 舒安庆^{1,2*}, 马长春³, 刘 凯¹, 魏化中^{1,2}

(1. 武汉工程大学 机电工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉市压力容器压力管道安全技术研究中心, 湖北 武汉 430074;

3. 中国通用机械工程总公司, 北京 100050)

摘 要:工程中经常会碰到由不同材质材料组成的多层复杂结构, 对其进行应力分析极其繁琐, 且误差较大. 磷酸反应槽拱壁的设计施工工艺复杂, 内部应力经常造成施工裂纹. 通过合理简化, 利用 ANSYS 软件进行模拟分析, 为解决这种多层复杂结构的设计施工提供一种新的思路.

关键词:多层复杂结构; 限元分析; 酸反应槽; 拱壁碳砖

中图分类号: TB125 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2011.08.024

0 引 言

多层结构是指同一结构体系中, 采用两种或两种以上不同材料组成的承重结构体系. 常用的多层复杂结构有由钢筋混凝土和砖墙承重的结构体系砖砌体结构, 亦称砖混结构. 过去曾有过用木与砖墙承重组成的结构体系, 称为砖木结构, 目前已很少采用. 这类多层复杂结构均存在受力分析的问题, 且很难解决.

对于不同材质材料组成的复杂结构进行应力分析, 通常采用的理论解析方法推演繁琐, 边界条件和载荷形式有很多限制, 而且结构的分析方法也简化过甚, 不能透彻的反映结构受力实际情况. 施工设计时往往都是依靠工程师的实际工程经验, 这样就会出现设计偏差. 由于这些设计误差, 在施工中经常会使结构破坏, 延误工期, 甚至造成重大的经济损失.

针对这类多层复杂结构, 利用 ANSYS 软件, 对这种复杂结构进行三维有限元建模, 合理的加载载荷, 选取适当的边界条件, 进行数值分析, 得到了准确直观的结构应力状况, 为该类问题的工程设计, 合理的制定施工工艺, 提供了科学依据. 下面以磷酸反应槽的拱壁的应力分析为例来详细阐述这一分析方法.

1 问题描述

磷酸反应槽是磷酸装置生产工艺过程中的关键设备之一, 是磷酸反应的“心脏”, 特别容易被腐蚀, 因此磷酸反应槽的拱壁结构设计施工非常复杂. 绝大多数磷酸反应槽外部采用钢筋混凝土作为基槽体, 内部先内衬橡胶, 再衬碳砖的防腐模式^[1], 三者之间利用胶泥粘连, 如图 1 所示.

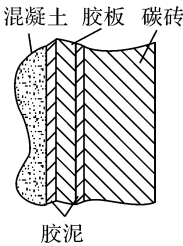


图 1 拱壁层的实际构成图

Fig. 1 Components of arch's carbon brick

三者材料性质差别很大: 混凝土是复合材料, 材料的均质性很差, 应力和应变成非线性关系; 碳砖是脆性材料, 外力作用下(如拉伸、冲击等)仅产生很小的变形即破坏断裂; 橡胶弹性材料, 收缩性很强. 在砌筑时碳砖经常会开裂. 为了分析这种多层复杂结构的砌筑时应力状况, 并找出碳砖开裂原因. 敖敏龙等人利用工作经验进行过初探^[2], 指出开裂的原因可能是由单块碳砖承在砌体中所受弯、剪、拉的复合应力和胶泥收缩变形对其产生的

收稿日期: 2011-05-08

作者简介: 李智帅(1987-), 男, 湖北仙桃人, 硕士研究生. 研究方向: 压力管道应力分析.

指导老师: 舒安庆, 男, 教授, 硕士. 硕士研究生指导老师. 研究方向: 压力容器压力管道、流体机械和搅拌设备的研究开发、新型高效过程装备及仿真技术. * 通讯联系人

拉应力导致,但是并没有指出应力最大处和最大值.本文采用采用 ANSYS 软件对该结构进行有限元分析,可以直观的进行表示出结构的受力分布情况,可以为设计分析设计时提供参考.

某现场施工方法是先砌拱门两边直线部分和两边部分拱弧(拱顶少 2 块砖),固化后再砌拱顶两条碳砖.反应槽拱壁结构尺寸图如图 2 所示.

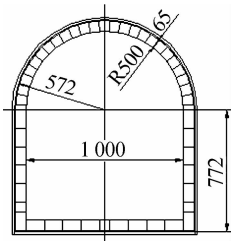


图 2 反应槽拱壁尺寸图

Fig. 2 Size of arch's carbon brick

但是根据现场施工资料反应,当反应槽拱的顶部两条碳砖砌好干固后,拱顶部碳砖开裂毁坏.为了找出事故原因,对此拱壁碳砖作三有限元分析,以获得拱壁碳砖的最大应力部位和应力场分布.

2 数学模型

在砌筑施工过程中,载荷主要来自于砌筑时砌缝间胶泥收缩产生的拉应力和自身的重力,现对模型进行如下假设及简化:①胶泥砌缝收缩均匀分布在碳砖砌体上;②碳砖、胶泥的力学性能各向同性;③砌筑胶泥的收缩性质等同于外力变形情况;④混凝土基体是刚体;⑤拱壁层的构成不考虑胶泥层如图 3 所示(通过多次试算表明胶泥层主要影响胶板层应力影响碳砖层,忽略胶泥层后对碳砖应力影响不大).

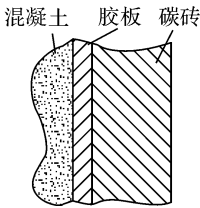


图 3 拱壁层的模型简化图

Fig. 3 Simplified model of arch's carbon brick

据弹虚位移原理有 $\int_V \delta \epsilon^T \sigma dV = \delta q^e f^e$,可得单位节点力与位移之间的关系式^[3]

$$f^e = K^e q^e \tag{1}$$

式(1)中: f^e 为结构总体载荷; K^e 为整体结构节点的刚度矩阵,其中

$$K^e = \int_V B^T DB dV \tag{2}$$

q^e 为整体结构节点的位移矩阵.

综合式(1)、(2)可得

$$q^e = f^e / \int_V B^T DB dV$$

因此,可求得各节点的应力 $\delta = DBq^e$.

其中: D 为整体结构节点的弹性矩阵; B 为整体结构节点的应变矩阵.

3 有限元模型建立

考虑拱门的几何模型具有左右对称的特点,因此作二分之一模型,拱门的实体模型如图 3 所示.

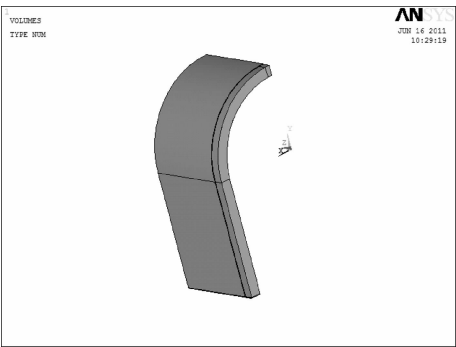


图 3 有限元实体模型

Fig. 3 The finite element solid model

模型采用 solid95 单元来模拟碳砖和橡胶板,共划分 31 332 个单元和 35 700 个节点,网格模型如图 4 所示.



图 4 有限元风格模型

Fig. 4 The finite element mesh model

根据数学模型中的假设,其物理参数如表 1 所示.

表 1 材料物理参数表

Table 1 Material physical parameter

参 数	混凝土	胶板	碳砖
体积密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.45	1.28	1.55
弹性模数/MPa	30000	40	9000
线膨胀系数/ K^{-1}	1×10^{-5}	66×10^{-6}	8.5×10^{-6}
泊松比	0.18	0.47	0.2
导热系数(常态) / $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	0.174	0.14	2.1

4 载荷和边界条件的施加

由于建立的是二分之一模型,反应槽拱门顶端施加对称约束,整个胶板与混凝土结合面施加全约束。

为了模拟拱门碳砖砌体受到因胶泥凝固收缩引起的拉应力,在计算中利用软件的温度应力的功能来施加因这种因胶泥凝固收缩产生的应力。

即令:单位长度砌体收缩=单位长度温度收缩
根据实际施工状态:平均每条砌缝收缩 0.064 mm,通过计算各段单位长度砌缝数量,计算各段单位长度砌体收缩量,对各段施加与之相当收缩量的温度载荷。

同时还要考虑碳砖和胶板的自重。
利用 ANSYS 单元的“生死”技术,来模拟两次砌筑拱门的过程,模拟拱门的二次受力,当砌拱门两边直线部分和两边部分拱弧的时候,该部分单元处于“活”的状态,顶部的碳砖则处于“死”的状态。当砌筑顶部碳砖是,则让顶部碳砖“复活”。

5 结果分析

碳砖为典型脆性材料,碳砖是否达到破坏极限,采用第一强度理论作为评判标准^[5]。实验测得的所用碳砖抗拉强度为 $\sigma_{1u}=10$ MPa。

(1)图 4 为反应槽拱壁碳砖整体的应力云图,从图上可以看出,拱壁顶部碳砖对称面的应力集中较大,达到了 11 MPa,超过了碳砖的抗拉强度,引起了断裂,在实际施工中的断裂部位正是发生在此部位分析结果与实际情况一致。

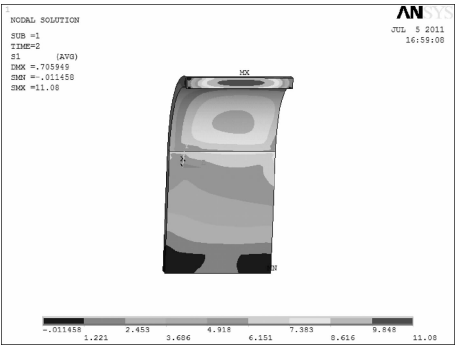


图 4 反应槽拱壁碳砖整体的应力云图
Fig. 4 Nephograms of arch's carbon brick

(2)图 5 为橡胶板整体应力云图,从图上可以看出,胶板层在拱的直段第一主应力比较小在 0.7 MPa 以下;拱的弧段应力约 1.4 MPa,弧段边缘局部应力较大,最大拉应力 5 MPa。由于前面简化了胶泥层以及胶板的弹性模量 E 的非线性,胶板层的应力只能作为影响碳砖应力因素的参考。

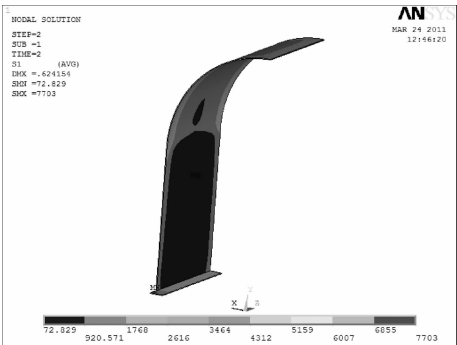


图 5 橡胶板整体应力云图
Fig. 5 Nephograms of arch's rubber plate

(3)为了直观的拱门顶部碳砖的应力随拱门厚度的变势,并从应力中判断开裂原因,在拱门模型顶端内表面选取两个节点 11 421 和 1 143(拱门顶部截面两短边的中点)做一条路径,观察这条路径上所有节点的应力变化趋势,路径图如图 6 所示。变化趋势图如图 7 所示。

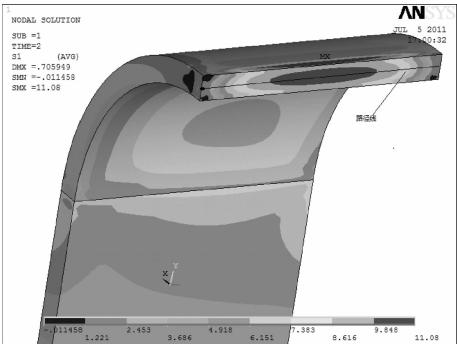


图 6 节点路径图
Fig. 6 The path of node

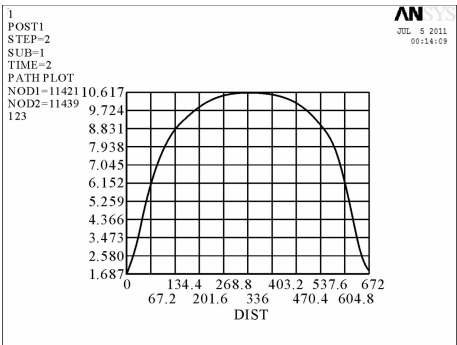


图 7 节点应力沿路径变化图
Fig. 7 Nephograms of the node which on the path

从图 7 可以看出路径上的节点,应力由两端向中间逐渐增大,大致成抛物线变化,在中间区域达到最大 11.08 MPa,而拱门碳砖开裂也正是在该区域。

6 结 语

通过对施工现场碳砖砌筑的条件和反应槽结构的分析,经合理简化,建立了多次结构磷酸反应

槽拱壁. 通过有限元计算得出的结果,反映了施工现场的实际情况,为改进设计和制定合理正确的施工工艺提供了依据,同时也为此类多层复杂结构的应力分析提供了借鉴.

参考文献:

[1] 沈富,雍开林. 磷酸反应槽的衬胶应用[J]. 云南化工,2007,34(3):41-42.

[2] 敖敏龙,钟立民,张建伟. 磷酸反应槽衬里碳砖裂纹的初探[J]. 化工设备与腐蚀,1999(3):48~51.
[3] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 兰州:西北工业大学出版社,2000.
[4] 蒋玉川,张正. 弹性力学与有限元方法简明教程(第一版)[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
[5] 范钦珊. 材料力学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

Research on finite element stress analysis of complicated structure

LI Zhi - shuai¹, SHU An - qing^{1, 2}, MA Chang - chun³, LIU Kai¹, WEI Hua - zhong^{1,2}

- (1. School of Mechanical & Electrical Engineering Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Research Center of Pressure Vessel and Pipeline Safety Engineering, Wuhan 430074, China;
3. China National General Machinery Engineering Corp, Beijing 100050, China)

Abstract: Traditional stress analysis method for the complicated structure is extremely cumbersome and often cause error. Phosphoric acid reactor is the typically model of this complicated structure and it can be destroyed by inner stress easily. ANSYS finite element analysis software is used to take analysis this model in this paper and provides a new analysis method is provided for this complicated structure.

Key words: complicated structure; finite element analysis; phosphate reactor; arch's carbon brick
本文编辑:陈小平



(上接第 67 页)

Design and assemble control of lifting station of Tianxingzhou Bridge

JIN Yong - zhong

(The Fifth Company of Zhongtie Major Bridge Group, Jiujiang 332001, China)

Abstract: Introduced construction technology of box - beam MSS assemble and lifting in Tianxingzhou Changjiang Bridge, including the calculation of bearing capacity of foundation soil, strength calculation of the steel columns and box - beam lifting, the calculation of structural stability, and the key points of lifting station installation. The integral lifting and installation can speed up process of construction and guarantee the quality of construction. Practice indicates, movable shuttering form lifting had its own features and advantages, which was confirmed safe and controllable, and simple to operate.

Key words: movable shuttered form; box girder; lifting station; design; construction control; integral lifting and installation
本文编辑:张瑞