

文章编号:1000-582X(2012)05-132-05

大型钾盐结晶器结构强度模态分析

李 浩^{1,2},袁雪冬²

(1. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 2. 国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司, 新疆 哈密 839000)

摘 要:结晶器是 120 万吨钾盐生产线的关键设备,是复杂壳体结构、巨大而单薄,并伴随有动力搅拌过程。因此必须对结晶器的结构可靠性以及模态进行分析。利用 COSMOS 大型综合有限元计算软件对结晶器的结构强度、安全系数以及多阶模态进行了分析。分析结果表明,结晶器支撑部位静强度满足要求;结晶器结构强度最薄弱部位是井字钢梁和结晶器焊接结合处,等效应力为 260 MPa,安全系数为 1.243;结晶器主要结构在动态扰动下稳定性满足要求,不会发生共振。

关键词:结晶器;结构强度;模态分析;有限元

中图分类号:TD402

文献标志码:A

Finite element analysis for the structure of large crystallizer

LI Hao^{1,2}, YUAN Xue-dong²

(1. China University of Mining & Technology(Beijing), Beijing 100083, P. R. China;

2. SDIC Xinjiang Luobupo Potash Co., Ltd, Hami, Xinjiang 839000, P. R. China)

Abstract: Crystallizer is a key equipment of the 1.2 million tons production line. It is a complicated shell structure and a large but thin machine. The power mixing process is a typical property of the crystallizer. So the structure reliability and the modal of crystallizer should be analyzed. The structure strength, safety coefficient and multi-modal are analyzed by COSMOS which is large-scale finite element software. The results show that the static strength of the support part meets the requirement, the weakest part of the crystallizer is the weld point, the steel beam with the equivalent stress is 260 MPa, safety coefficient is 1.243 and the stability of crystallizer main structure under dynamic disturbance meets the requirements, thus resonance doesn't occur.

Key words: crystallizer; structure strength; modal analysis; finite element

罗布泊含有丰富的钾盐资源,资源探明量为 25 亿吨^[1-3],占中国钾盐探明储量的一半。国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司经过不断的技术探索研究,进行工业工艺自主创新开发,其“利用罗布泊含钾卤水制取硫酸钾工艺”及装置属世界首创^[4]。其中,结晶器^[5]设备是本工艺系统的核心装置之一,其运行的可靠与否,直接影响硫酸钾产品的各项指标及产量。因此,国投新疆罗布泊有限公司 120 万吨钾盐

生产线建设中,对 13 m 结晶器进行结构强度有限元和模态分析校核论证显得尤为重要。

由于“利用罗布泊含钾卤水制取硫酸钾工艺”属于我公司发明专利,而能够适应该工艺的结晶器,国内外都没有同类或相似设备可以借鉴来设计,只能通过结晶器内部物质复分解反应机理,通过一点一滴实践和改进来研究,该结晶器首次应用是在 2 万 t 硫酸钾实验厂 6 m 结晶器上,经过多次改进和技术优化而

收稿日期:2012-01-04

基金项目:国家“十五”科技攻关计划课题资助项目(2001BA602B-05)

作者简介:李浩(1955-),中国矿业大学博士研究生,国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司研究员,主要从事地球物理方向的研究,(E-mail)lihaoscsc@vip.sina.com。

成功应用;同时结晶器在2万t硫酸钾实验厂应用成功后同时申请通过了国家实用新型专利。随着公司的扩大发展,继而又在4扩8项目中,逐步放大到8m直径。我们发现在8m结晶器运行时,当上层搅拌转速提高到90 r/min以上时机体某些部位会发生共振,将对设备造成严重的安全隐患。为避免在13m结晶器发生类似的共振问题而产生安全隐患,必须对13m结晶器进行流态有限元、结构强度有限元和模态分析,通过结构优化来避免共振,确保设备的稳定可靠运行。模态是机械结构的固有振动特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可以由计算或实验分析取得。基于线性叠加原理,一个复杂的振动系统可以分解为许多模态的叠加,这样一个分解过程称为模态分析。笔者选用COSMOS进行静态结构有限元分析和模态分析,得到结晶器的结构安全系数和结晶器固有频率及相应的振型,来论证结晶器结构强度是否满足强度要求,局部是否可能发生共振。

1 结晶器及分析目的

结晶器是120万吨钾盐生产线的关键设备。本结晶器直径13m,高14m,体型硕大,整体呈倒锥形,主要由外壳、上平台、上搅拌器、下搅拌器、底部支座等关键部件构成,详见图1。

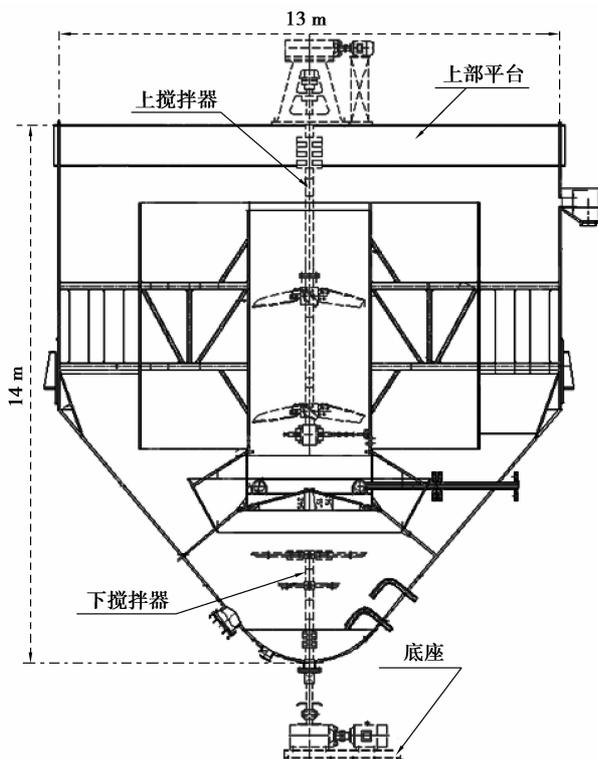


图1 结晶器剖面图

结晶器在生产过程总重将达556t,同时伴有复杂机械运动(多重搅拌),其受力状态也很复杂,除了重力荷载以外,还受流体运动所产生的附加荷载。因此必须对结晶器的结构可靠性以及模态进行分析。

COSMOS有限元^[5-14]软件具有功能强大、操作简单、易学易用等优点,可以满足流固耦合下的结构强度分析及多维模态分析。

有限元分析的主要任务:1)13m结晶器壳体承受母液、正确支撑时的静态受力分析;2)结晶器顶部“井”字钢梁及其与结晶器壳体连接处的受力分析计算;3)13m结晶器壳体的横向水平模态分析计算,在搅拌动力水的作用下是否可能发生局部横向共振的问题。

2 几何模型及网格

为保证计算的精度和正确性,在进行模态分析计算时要求模型质量较高,因此,在实际计算中在不影响计算精度和正确性的前提下,将模型尽可能简化,主要表现在上搅拌轴的支撑用梁来代替,内部加强环和溢流结构暂不考虑,其他完全按照实际情况进行仿真模拟建模,同时将上下搅拌轴也考虑进去作为一体化处理。

由于结晶器对称结构,有限元分析时可以简化,只研究1/4部分,约束使用对称约束,如图2所示。有限元模型采用4面体实体单元,网格划分后,共计105200个单元,206141个节点,如图3所示。

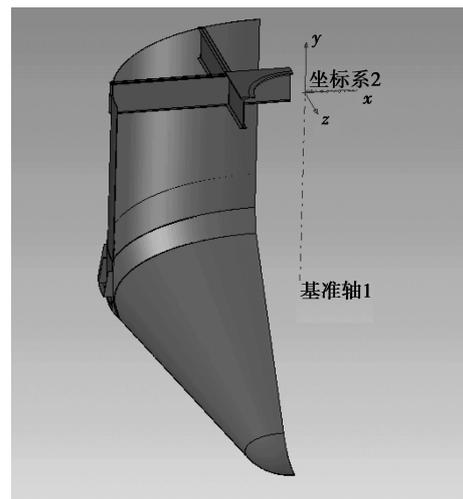


图2 结晶器有限元分析几何模型

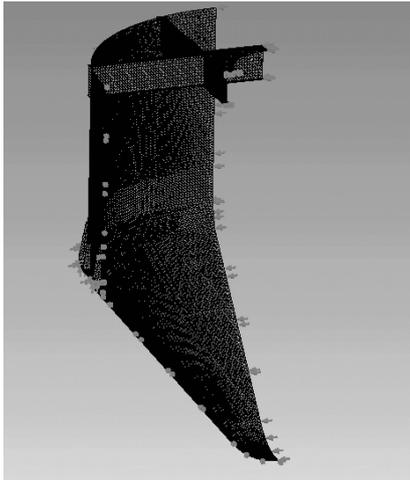


图 3 结晶器有限元网格

3 边界条件

3.1 位移约束

模型座底下面作为固定支撑面, x, y, z 3 个方向约束位移均为 0, 壳体对称部分采用对称约束。

3.2 基本物理载荷

壳体内部表面受流体静压力, 壳体受力函数为

$$f(y) = \rho gh, \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; g 为重力加速度; h 为深度。

上平台钢梁承受荷载为: 上部荷载 200 kg/m^2 、上搅拌重量 $8\,900 \text{ kg}$ 及皮带头部重量 $55\,000 \text{ kg}$ 。

上平台钢梁还受上搅拌扭矩 $49\,200 \text{ NM}$, 顺时针方向。模型基本物理荷载如图 4 所示。

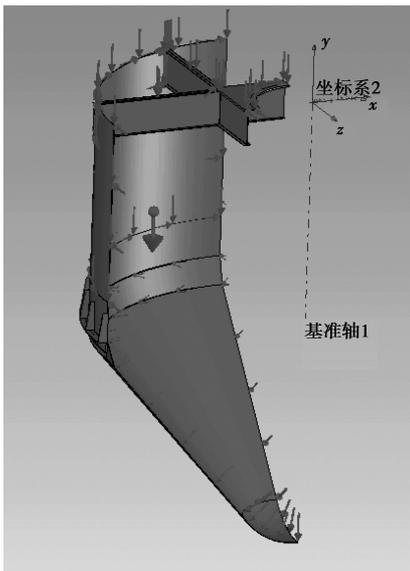


图 4 基本物理载荷

3.3 耦合载荷

由于结晶器内有流体运动, 将会产生附加耦合

载荷。因此首先要将流场的具体情况计算出来, 然后作为一个输入载荷与静载荷一起进行应力场耦合计算。

处理这种问题一般有 2 种方案, 分别是顺序耦合与直接耦合。其中顺序耦合与实际工况更为相似, 它将流场中的节点压力作为面载荷施加到随后的结构分析中。如果场之间的耦合可以是双向的, 则是强顺序耦合, 如果场之间的耦合必须按照一定的顺序, 则为弱顺序耦合, 本结构应力场分析中采用了弱顺序耦合计算。

耦合载荷分为作用在壳体锥面、圆筒壁面上的压力场, 具体参考结晶体等部位的压力分布情况进行设置, 如图 5 所示。

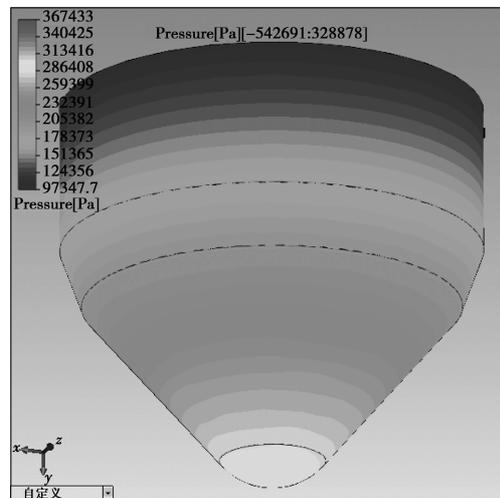


图 5 壳体内侧压力分布图

4 物理模型及材料参数

计算采用 Miss 强度准则进行强度可靠性分析, 材料选用 16 mm 厚的压力容器材料 16MnR 合金钢材质, 其材料属性参数如表 1 所示。

表 1 材料属性参数

弹性模量 /MPa	热导率 /[W · (mK ⁻¹)]	抗剪模量 /MPa	热扩张 系数	泊松比
210 000	50	7 900	1.3E-005	0.3
密度 /(g · mm ⁻³)	比热 /(J · (kg · k) ⁻¹)	张力强度 /MPa	屈服力 /MPa	
0.007 7	460	510	345	

5 静态分析过程

图 6 是结晶器结构静力学分析的等效应力分布

图。可以看到整个结晶器最大等效应力出现在上部平台横梁上,为 202.5 MPa,小于材料结构屈服强度 345.0 MPa。

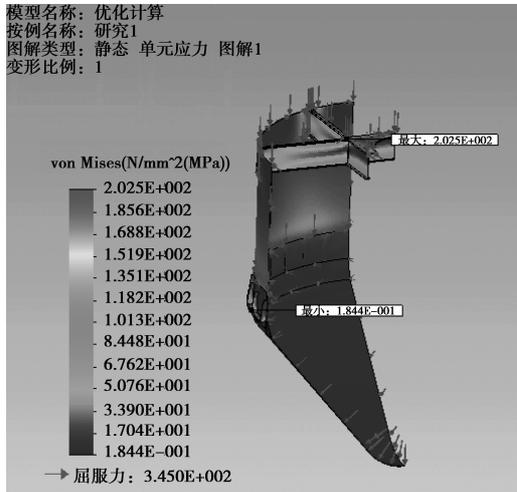


图 6 应力分布图

结晶器最大剪应力为 163 MPa,安全系数取 1.2,按照第三强度理论:

$$[\sigma] = \sigma_s / \text{安全系数} = 287.5 \text{ MPa},$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_y^2 + \tau_{xy}^2} = 260.0 \text{ MPa}.$$

显然 $\sigma \leq [\sigma]$,所以结晶器结构强度满足要求。

令 k 为安全系数:

$$k = [\sigma] / \sigma. \quad (2)$$

图 7 为安全系数等值线图,可知最小安全系数为 1.243。在上平台井字钢梁和结晶器壳体连接处。

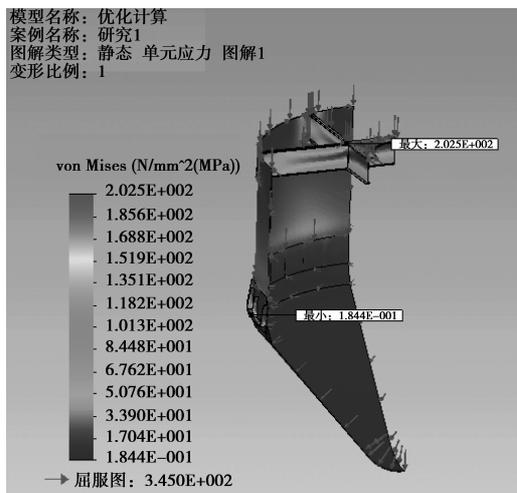


图 7 结晶器安全系数图

由于实际计算偏向保守。从结晶器运行结果和受力状态分析可以看出,结晶器受力状态相对单纯,

工程实施时可对井字岗梁和结晶器的结合处进行强化处理。

6 模态分析

模态分析用于确定结构的振动特性,即结构的固有频率和振型,它们是承受动态载荷的结构设计中的重要参数。同时,模态分析也是其它动力学分析问题所必需的前期分析过程。

结晶器的搅拌器是产生振动的源头,因此这里主要分析搅拌轴的固有频率与转速的关系,由于下搅拌转速、轴长远小于上搅拌轴,因此以上搅拌轴为研究对象通过计算系统的固有频率的频谱范围,分析设备的主振型,得出低阶固有频率。

6.1 上搅拌器几何模型及材料参数

进行模态分析必须在上面的有限元模型中如加上搅拌器。上搅拌器长 8.333 m,有 2 套 3 瓣叶扇。叶扇半径 1.45 m。上搅拌器同样采用 4 面体实体单元。上搅拌器几何模型及网格详见图 8。上搅拌器材料为合金钢,力学参数见表 2。

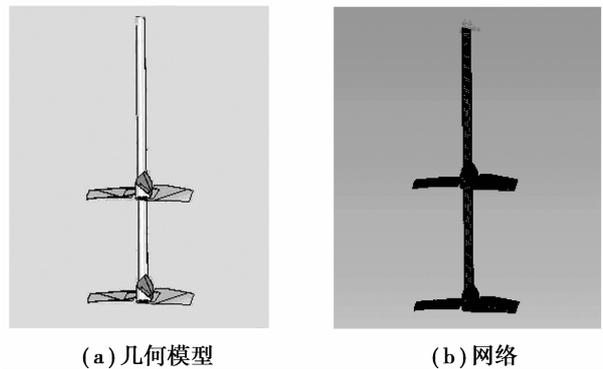


图 8 上搅拌器几何模型和网格图

表 2 上搅拌器材料力学参数

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
7.85×10^3	1.96×10^2	0.25

6.2 计算结果

计算得到搅拌器的前 5 阶固有频率,见表 3。从表 3 中可以看出,整个搅拌器的固有频率都比较高,最低的第一阶频率为 36.341 Hz,与额定转速频率、额定转速乘叶片数频率相比,远远高于这些可能的激振频率。所以排除了搅拌器在这些振源下的共振可能。

表 3 搅拌器的各阶固有频率

阶数	频率/Hz	转速/(r·min ⁻¹)
1	8.638 1	518.286
2	8.639 6	518.376
3	8.774 6	526.476
4	8.797 9	527.874
5	9.000 1	540.006

7 结 论

设计计算的 13 m 钾盐结晶器不仅要满足化工工艺生产要求,还要满足物理受力及动力学过程中的安全要求,计算结果表明:

1) 结晶器支撑部位静强度满足要求;

2) 结晶器结构强度最薄弱部位是井字钢梁和结晶器焊接结合处,等效应力为 260 MPa,安全系数为 1.243;

3) 结晶器主要结构在动态扰动下稳定性满足要求,不会发生共振。

参考文献:

- [1] 宣之强, 焦鹏程, 刘成林, 等. 新疆罗布泊钾盐矿床成因类型探讨[J]. 化工矿产地质, 2011, 33(1): 22-26.
XUAN ZHI-QIANG, JIAO PENG-CHENG, LIU CHENG-LIN, et al. Discussion on potassium deposits genetic types in Lop Nur saline lake, Xinjiang province[J]. Geology of Chemical Minerals, 2011, 33(1): 22-26.
- [2] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积及其成钾效应分析[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 322-329.
LIU CHENG-LIN, JIAO PENG-CHENG, WANG MI-LI, et al. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(3): 322-329.
- [3] 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 等. 罗布泊杂卤石沉积特征及成因机理探讨[J]. 矿床地质, 2008, 27(6): 705-713.
LIU CHENG-LIN, WANG MI-LI, JIAO PENG-CHENG, et al. Sedimentary characteristics and origin of polyhalite in Lop Nur salt lake, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(6): 705-713.
- [4] 李浩, 唐中凡, 尹新斌, 等. 利用罗布泊盐湖卤水制取硫酸钾工艺试验研究[J]. 盐业与化工, 2008, 37(2): 9-12.
LI HAO, TANG ZHONG-FAN, YIN XIN-BIN, et al. Experimental study on the process of extracting potassium sulfate from brine in the Lop Nur salt lake[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2008, 37(2): 9-12.
- [5] 蔡少武, 王同敏, 徐军, 等. 新型圆坯结晶器铜管结构模拟优化设计[J]. 料科学与工艺, 2010, 18(4): 500-503.
CAI SHAO-WU, WANG TONG-MIN, XU JUN, et al. Design of novel round copper mould tube cavity for continuous casting steels by numerical simulation [J]. Materials Science and Technology, 2010, 18(4): 500-503.
- [6] 王亮, 任晓芳. 异形真空室壳体的结构强度分析[J]. 机械设计与制造, 2011, 39(8): 191-193.
WANG LIANG, REN XIAO-FANG. Structural strength analysis for an alien vacuum shell [J]. Machinery Design & Manufacture, 2011, 39(8): 191-193.
- [7] TANAKA K, OODAIRA H, TERANISHI Y, et al. Finite-element analysis of the collision and bounce between a golf ball and simplified clubs [C] // The Engineering of Sport 7. [S. l.]: Springer, 2008: 653-662.
- [8] MIYAZAKI Y, UJIHASHI S, JIN T, et al. Effects of the mechanical properties of the shell and liner on the shock absorption of helmets [C] // The Engineering of Sport 6. [S. l.]: Springer, 2006: 145-150.
- [9] FEI Y Y, YANG Y H. Fem analysis on geogrid reinforced asphalt concrete pavement [C] // Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering. [S. l.]: Springer, 2008: 677-682.
- [10] ZARATE F. Learning to program the fem with Matlab and gid [J]. Structural Analysis with the Finite Element Method. [S. l.]: Springer, 2009: 383-413.
- [11] BLAAUWENDRAAD J. FE analysis for different supports [C] // Plates and FEM. [S. l.]: Springer, 2010: 237-250.
- [12] 刘文川, 张锡文, 何枫. 简化有限元方法的波纹管模态分析[J]. 应用力学学报, 2007, 24(2): 289-294.
LIU WEN-CHUAN, ZHANG XI-WEN, HE FENG. Modal analysis of bellows with simplified FEM [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(2): 289-294.
- [13] OKUDA H, NAKAJIMA K, IIZUKA M, et al. Parallel finite element analysis platform for the earth simulator: geoFEM [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, 2659: 600.
- [14] WERNER U. Finite element analysis of relative shaft vibrations of two-pole induction motors with static rotor eccentricity [J]. Forschung im Ingenieurwesen, 2010, 74(1): 49-61.

(编辑 郑洁)