

EC-301 旋转叶轮整体结构应力分析

周传月 王旭

(哈尔滨七〇三研究所)

[摘要]通过对闭式离心叶轮 EC-301 的整体结构三维应力分析,提出了一种用温度处理过盈配合,用通用有限元分析程序对旋转叶轮进行整体结构应力分析的新方法。同时给出了确定叶轮与轴之间适宜过盈量和判断松脱的方法。

关键词 叶轮 有限元 应力分析

分类号 TK474.8

1 概述

大庆三十万吨乙烯扩容改造工程的裂解气压缩机 EC-301 叶轮直径 $D = 965.2$ mm, 轴孔直径 $d = 226.5$ mm, 轴向宽度为 180 mm, 有 19 只叶片, 是一大流量的三元流叶轮。其叶片倾角较大, 最大倾角达 59.14° , 大倾角叶片对叶轮的应力分布有着重要的影响。经典转动轮盘的结构应力分析理论, 认为旋转圆轮的最大应力应位于孔口部位。对于轴流式、离心式叶轮的应力分布, 由于其结构特性应力分布有着不同的特点。过去对旋转叶轮的应力分析一般简化成轴对称问题, 因而不能给出准确的应力分布, EC-301 叶轮是周期性旋转对称结构, 却不是轴对称问题, 但可以划分成 19 个物理、几何、边界和受载均完全相同的子区域, 可取其中的一个子区域建立有限元模型, 但是这种模型在使用 SAP、ADINA 等通用有限元结构分析软件时, 其旋转对称面的边界条件难于处理, 另外叶轮与轴之间的过盈配合也难于模拟。随着计

算机硬件和结构分析软件的发展, 对叶轮进行整体大规模的结构应力分析已不再受限制。本文就探讨一种使用通用有限元结构分析软件 Super SAP91 对旋转叶轮进行整体结构应力分析的方法。

2 计算方法

2.1 有限元模型

EC-301 叶轮由轮盘、轮盖和 19 只叶片组成, 它是具有周期旋转对称的结构系统, 其几何形状、物理性质、边界条件和受载状态沿周向呈周期性变化, 它不是轴对称问题, 但可以划分成 19 个几何、物理、边界和受载完全相同的子区域。先取叶轮的一个子区域建立有限元模型, 每个子区域中包含一个叶片和周期对称的一部分轮盘和轮盖。轮盘和轮盖用三维块单元进行模拟, 叶片用板壳单元进行模拟。在这一子区域上轮盖分为 34 个三维块单元, 轮盘划分为 38 个三维块单元, 叶片划分为 64 个三维板壳单元。这一子区域是整个

收稿日期 1995-06-09 收修改稿 1995-07-11

结构的 $1/19$, 利用前处理的旋转功能把一个子区域拓广到整个结构, 因此轮盘共划分为 646 个三维块单元, 轮盘共划分为 722 个块单元, 19 个叶片共划分为 1216 个板壳单元, 与叶轮过盈配合的轴划分为 456 块单元, 整个模型的节点总数为 4541, 三维块单元总数为 1824, 板壳单元总数为 1216, 自由度总数为 16302, 其有限元网格图见图 1。

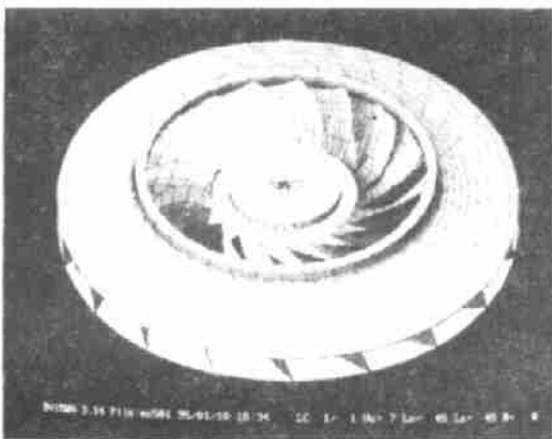


图 1 EC-301 叶轮有限元网格图

边界条件:

轴线上各节点处理成六个自由度全部约束, 其余节点是自由的以模拟叶轮和轴共同旋转状态。

荷载情况:

叶轮与轴是过盈配合, 直径上过盈量按 $\Delta = 0.4 \text{ mm}$ 计算, 转速按最大连续(最大工作)转速 $n_0 = 5366 \text{ r/min}$ 计算。

计算采用通用有限元结构分析软件 SuperSAP91, 该软件有强大的前后处理功能。它的前处理提供了一功能强大的交互式 CAD 图形系统, 也是专门为有限元网格生成而设计的。它能在屏幕上直接利用平移、旋转、复制、粘接等各种方式构造复杂的三维模型, 一旦模型绘制完成, 其前处理软件就能自动正确地把图形换成有限元计算所需的全部

节点数据和单元数据, 同时有一个使计算结果可视化的后处理程序, 它能突破 DOS 操作系统寻址 640K 内存的限制, 可在保护方式下运行程序, 解题速度大大提高。本计算在有 4M 内存的 AST486 机上进行, 计算一次大约需要 3 小时。

2.2 计算方法

EC-301 叶轮和其它许多闭式叶轮一样是靠与轴的过盈配合产生的摩擦扭矩来传递力矩进行工作的, 为保证叶轮在正常工作状态不致于松脱, 就要确定一适宜的过盈量, 而这一过盈量在保证不松脱的同时, 又要保证装配后应力值在许用范围之内, 因此过盈量的计算成为工程设计中的一个关键问题。通用有限元结构分析程序 SAP5、ADINA 等有适当的能处理过盈配合的单元, 本方法用温度变化来处理过盈配合。

众所周知, 叶轮与轴实际装配时, 要加热叶轮使之温度升高, 整个叶轮都要沿径向膨胀, 达到一定温度时, 叶轮上轴孔的膨胀量等于过盈量即轮盘内孔直径等于轴直径, 轴就可与叶轮配合, 等温度下降, 叶轮就会与轴套紧, 产生过盈配合。本文的方法就是模拟这一过程。

以 EC-301 叶轮为例给出这一方法的几个步骤:

1 确定零应力参考温度(初始温度)为 0°C (不仅限于 0°C , 它只是一个基准温度), 取叶轮节点温度(终了温度)为 100 个温度单位(计算中取为 100°C), 即叶轮单元的温度均为 100°C 。轴上所有单元的弹性模量选取(给定)为 20 MPa , 比叶轮弹性模量 $2.07 \times 10^5 \text{ MPa}$ 小 4 个数量级(一般小 3 个或 4 个数量级, 太大轴的刚度不可忽略, 太小会引起刚阵奇异), 这样轴的刚度贡献远小于叶轮的刚度贡献, 叶轮的膨胀受轴的影响很小, 经以上处理后进行计算。

计算结果表明: 盘孔边上的节点沿径向

位移 $DR = 0.1358 \text{ mm}$, 说明温度升高 100°C , 孔边直径增大 0.2716 mm , 过盈量按最大过盈量 $\Delta = 0.4 \text{ mm}$ 计算, 需要升高的温度为 147.3°C . 节点温度换成 147.3°C , 其它参数保持不变重新计算. 计算结果表明: 孔边各节点均匀膨胀, 其径向位移是 0.2001 mm , 刚好是半径过盈量, 说明孔边各节点径向位移量与温度成线性关系变化.

2 零应力参考温度(初始温度)取为 147.3°C . 叶轮节点温度(终了温度)取 0°C , 即叶轮温度从 147.3°C 下降到 0°C , 而轴的温度保持不变. 轴的弹性模量取实际值 $2.03 \times 10^5 \text{ MPa}$, 这样就可模拟叶轮温度由 147.3°C 降到 0°C 过盈配合后的叶轮内的应力分布情况.

此时的状态就是产生过盈配合而没有工作的状态, 其当量应力(Mises 准则)分布云图见图 2, 由云图可见其最大应力出现在轮盘轴孔附近, 最大当量应力值为 480.1 MPa . 如计算出的应力值过大可调整过盈量使最大应力在许用范围之内.

作) 转速 $N_s = 5366 \text{ r/min}$, 重新计算, 结果表明: 当量应力(Mises 准则)最大值出现在叶片与轮盘和轮盖相接的外缘, 而不是出现在轮盘轴孔附近, 其值为 648.3 MPa (叶轮材料的屈服极限为 800 MPa), 与工程上的一些破裂事故发生的位置相吻合, 但与经典轴对称分析结果相差较大, 轴对称分析应力最大值出现在轴孔附近. 因此, 对叶片倾角较大的叶轮轴对称分析与实际情况相差较大, 三维分析代替轴对称分析是必要的, 工程上的许多破裂事故也说明了这一点. 工作状态的应力分布云图见图 3.

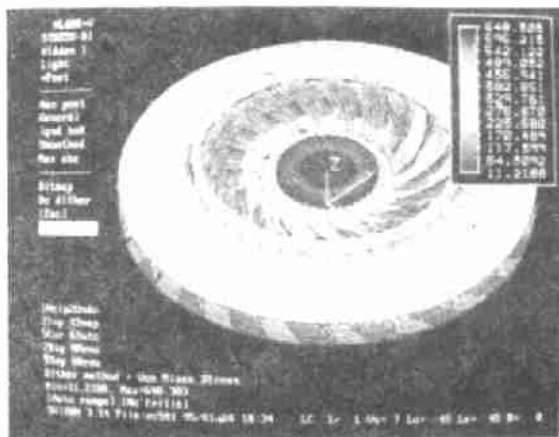


图 3 EC-301 叶轮在工作状态下的应力分布云图(MISES 准则)

以上计算出了过盈量为 0.4 mm 时叶轮的应力分布情况, 下面检查此过盈量是否适当, 给出判断是否松脱的方法:

首先, 查看轴上各单元的应力, 由应力值的符号判断. 轴上单元应力值为负号时受的是压应力, 说明轴受压没有松脱. 相反, 轴上各单元应力值是正值受拉应力, 说明轴受拉已经松脱.

其次, 查看轴和轴孔相接各节点的径向



图 2 EC-301 叶轮与轴过盈装配后的应力分布云图(MISES 准则)

3 保持其它参数不变加入离心载荷, 模拟正常工作状态, 转速取最大连续(最大工

位移情况,如轴均匀缩小说明叶轮与轴之间是压紧的,没有松脱;相反则说明叶轮与轴是脱开的,已经发生松脱。

计算结果表明:过盈量为 0.4 mm,转速为 5366 r/min 时叶轮与轴之间没有松脱。如果出现松脱可增大过盈量重新计算。

3 结束语

应用本方法使用 SAP、ADINA 等大型通用有限元分析程序对旋转叶轮进行整体结构应力分析是可行的。本文方法适用于任何旋

转叶轮,尤其是大紧度过盈配合叶轮,对其它周期旋转对称结构同样适用。

闭式叶轮应力状态比较复杂,三维有限元计算可以详细查出叶轮的应力分布。

本方法可用于调整叶轮与轴之间的过盈量,确定适宜的过盈量,为工程设计提供依据。

参 考 文 献

- 1 赵幼民. 离心式通风机叶轮飞裂原因分析及改进措施. 风机技术, 1991(2)

作者简介:周传月,男,1969年4月8日生,1994年4月毕业于哈尔滨工业大学计算力学专业并获得硕士学位,现在哈尔滨七〇三研究所三四室,从事结构强度和结构设计方面的工作。

通讯处:150030 哈尔滨 77—4 信箱

闭路太阳能储存系统

据“Modern Power Systems”1994年10月号报道,以色列魏茨曼研究所正在研制一种闭路太阳能储存和输送系统。该化学系统包括产生氢和一氧化碳的混合物。

该储存系统可用来在人口稀少的地区获得太阳能并以化学能的形式把它输送到数百英里以外的工业区。该系统的一个关键部件是由德国宇航研究所供应的。

德国给上述试验系统提供太阳能重整炉。该特殊的化学反应器被设计成吸收约 300 kW 太阳能。它利用太阳能激起二氧化碳和甲烷之间的化学反应,把这两种气体转换成一氧化碳和氢。该气体产物的混合物被储存或被输送。

重整炉被安装在太阳能塔的顶部,它从位于地面的 64 块反射镜接受日照。太阳能通过第二个聚能器,然后通过石英窗进入重整炉。

(学牛 供稿)

国外热电冷三联产的现状和前景—热电联产工程系列报告之四=The Present Status and Future Prospects of Overseas Engineering Projects for the Triple Production and Supply of Thermal Energy, Electricity and Refrigeration—the Fourth in a Series of Technical Reports on Cogeneration Systems [刊,中]/Qiang Guofang(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -259-265

On the basis of three earlier reports by the present author this paper focuses on some engineering projects for the triple production and supply of process steam, electricity and refrigeration, a new technology evolving from conventional cogeneration systems. The basic concepts and some specific application examples of the said technology are presented along with a general review of the related research work currently conducted in China and a brief assessment of the development prospects. Key words: cogeneration, district heating and refrigeration, heat pump, absorption refrigerator

退役航空涡扇发动机地面应用的有效途径之一——再热燃气—蒸汽联合循环=Combined Gas-steam Turbine Reheat Cycle—an Effective Approach for the Ground Application of Out-of-commission Aero-turbofan Engines[刊,中]/Wu Haoshan, Tao Yue (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -266-271

Discussed in this paper is a combined gas-steam turbine reheat cycle with an out-of-commission aero-turbofan engine serving as the gas generator. The combustion gas of an inner duct after mingling with the air of an outer duct is heated in a reheat combustor and then enters a power turbine to do expansion work. With the help of a waste-heat boiler a certain portion of the gas turbine exhaust gas heat is recovered to produce steam for driving a steam turbine, rendering useful power. Through specific examples and calculations it is shown that the said cycle features high power output and significantly enhanced cycle efficiency. Key words: aero-turbofan engine, combined gas-steam turbine reheat cycle, waste-heat utilization

离心叶轮内部三元流场计算在实际工程中的应用=The Calculation of the Inner Three-dimensional Flow Field of a Centrifugal Turbine Disc and Its Engineering Applications[刊,中]/Ma Shengyuan, Zhao Yousheng, Liu Yuliang (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -272-278

By use of two kinds of relative stream surface theory and a finite differential method the mathematical solution of a centrifugal turbine disc inner flow field has been attained. Based on the calculation results the authors have identified the deficiency of the original turbine disc structural design and calculated the inner flow field of the newly improved turbine disc. Key words: flow field, numerical computation, turbine disc modification

EC-301 旋转叶轮整体结构应力分析=The Stress Analysis of a Rotating Turbine Disc Integral Structure[刊,中]/Zhou Chuanyue, Wang Xu(Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -279-282

By way of the three-dimensional stress analysis of EC-301 closed type centrifugal turbine disc integral structure the authors have come up with a novel method of integral structure stress analysis for a rotating turbine disc by using general finite element analysis procedures and temperature-treated interference fit. Also given is a method for the identification of slackening out and the determination of a suitable interference fit between the turbine disc and the shaft. Key words: turbine disc, finite element, stress analysis

燃气轮机余热锅炉的设计特点=Design Features of Waste-heat Recovery Boilers for Gas Turbines[刊,中]/Chen Qiduo, Liu Changhe, Zhao Shiguang, Chen Bin, Sun Hongyu. (Harbin 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(5). -283-290