

# 回转式空气预热器接触式柔性密封可靠性设计

王庆峰, 何立东

(北京化工大学 诊断与自愈工程研究中心, 北京 100029)

**摘 要:** 接触式柔性密封是针对回转式空气预热器泄漏问题的一种新技术, 可靠性是接触式柔性密封性能的重要指标。基于 ANSYS 的可靠性设计方法, 运用 ANSYS 的 PDS 模块, 将有限元方法和可靠性设计理论相结合, 对接触式柔性密封进行三维参数化建模, 并编制 APDL 命令流, 建立可靠性分析文件对接触式柔性密封进行了可靠性设计。在置信度为 95% 的情形下, 接触式柔性密封的可靠性为 96.91%。结果显示, 接触式柔性密封的结构是可靠的, 得到了各结构参数的设计范围, 波厚和总长是影响接触式柔性密封的主要因素, 对接触式柔性密封的设计与研究有一定的参考价值。

**关 键 词:** 回转式空气预热器; 接触式柔性密封; 可靠性设计; ANSYS/PDS

中图分类号: TK223.3; O242 文献标识码: A

## 引 言

空气预热器是提高锅炉效率的重要设备<sup>[1]</sup>, 在实际运行中, 回转式空气预热器漏风率高是十分棘手的问题, 是该类设备的致命缺点, 严重影响了锅炉机组的安全性和经济性。控制预热器的漏风率主要是从预热器的结构考虑, 传统的密封方式采用非接触密封, 如间隙控制系统和双密封技术<sup>[2-4]</sup>, 但都仍然存在密封间隙, 漏风较大, 所以不能最大限度地降低预热器漏风。接触式柔性密封是一种先进的密封技术, 应用于回转式空气预热器上可以实现预热器的“零”间隙密封, 能够明显减小预热器的漏风率, 从而提高锅炉机组的效率, 降低能源消耗<sup>[5]</sup>。接触式柔性密封的可靠性是衡量其好坏的重要指标。

不确定性是自然界各种事物固有的特性。在接触式柔性密封设计中, 建立的分析模型都是经过各种假设和理想化而得出的, 但其材料属性、加工公差、边界条件和载荷等总具有不确定性, 它们的真实

值往往是无法得到的。因此, 在运用有限元方法分析接触式柔性密封结构中, 所有的结构参数都是不确定的, 都具有一定程度的随机性或模糊性。在分析评定中考虑输入变量的随机性, 采用概率评定方法, 不但能给出比较准确的失效概率值, 而且可以给出结构改进方案的参数敏感性分析结果。

本研究利用有限元通用软件 ANSYS 的概率设计功能对接触式柔性密封进行可靠性设计, 对接触式柔性密封的设计与研究具有一定的参考价值。

## 1 基于 ANSYS 的可靠性设计法

### 1.1 可靠性设计的基本原理

可靠性设计法, 是分析所建立模型中的一些输入参数和假设的不确定性对分析结果的影响, 并用可靠性指标对结果进行判断, 从而在不能完全消除输入参数的不确定性的情况下, 提高分析的准确性和设计产品的质量与可靠性<sup>[6]</sup>。同时, 通过可靠性设计可以在保证构件安全的基础上, 避免不经济的设计。在机械设计中, 可靠性设计是以产品的失效和可靠性为研究对象的一种设计方法, 是结构计算、设计内容的重要组成部分。

作为一种可靠性设计方法, 概率设计法是把所涉及的变量, 都处理成服从一定的概率分布的多值的随机变量, 这些变量可通过概率函数进行多值变换, 得到应力和强度的概率分布。

### 1.2 有限元分析软件 ANSYS 及其 PDS 模块

ANSYS 的 PDS (Probabilistic Design System) 模块就是将有限元技术与概率设计技术相结合, 即基于有限元的概率设计系统, 是一种有效的可靠性设计方法。主要解决: (1) 根据模型中输入参数的不确

收稿日期: 2008-04-28; 修订日期: 2008-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50675013); 国家 863 高技术基金资助项目 (2007AA04Z422); 广东省教育部产学研结合基金资助项目 (2007B090400114)

作者简介: 王庆峰 (1977-), 男, 黑龙江大庆人, 北京化工大学讲师。 Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

定性计算所求结果变量的不确定程度;(2)确定由于输入参数的不确定性导致的结构失效概率数值;(3)已知容许失效概率确定结构行为的容许范围,如最大变形、最大应力等;(4)判断对输出结果和失效概率影响最大的参数;(5)计算输出结果相对于输入参数的灵敏度;(6)确定输入变量与输出结果变量之间的相关系数等。

### 1.3 ANSYS 可靠性设计的基本过程

利用面向对象程序设计技术,基于数值模拟方法编制 APDL 语言程序进行可靠性设计,可以取得较好效果。基本过程由生成分析文件、可靠性设计阶段、结果后处理组成。(1)生成分析文件,包括预处理模块、求解模块和结果提取等内容。其中,预处理模块,设定单元类型、实常数、材质,构建结构实体模型并进行网格划分等,构建实体模型时必须采用参数化建模;求解模块,进行定义分析类型及相应选项、施加载荷、确定载荷步选项等并求解;后处理模块,进行求解结束后,使用 GET 命令提取计算结果,将值赋给将被指定为输入变量、输出结果变量的参数。(2)可靠性设计阶段,包括:进入可靠性设计模块,指定可靠性分析文件;选择、定义输入变量以及输入变量之间的相关系数,确定各输入变量服从的分布类型、分布函数及其参数;指定输出结果变量;选择分析工具和方法;执行可靠性分析循环,将结果以文件形式保存下来。(3)结果后处理,包含抽样过程显示、绘制设计变量取值分布柱状图、绘制失效概率分布函数、确定相关系数矩阵、灵敏度分析、生成可靠性分析报告等。

## 2 接触式柔性密封技术

接触式柔性密封技术是解决回转式空气预热器漏风问题的一种有效方法,其技术性能要点为:(1)接触式柔性密封通过接触外壳,实现“零”间隙;(2)针对热变形量造成的间隙变化,接触式柔性密封具有往复伸缩的弹性;(3)为了不增加由于接触式柔性密封与外壳的摩擦力,造成电机超负荷,尽量选择使接触式柔性密封刚度小的结构形式。

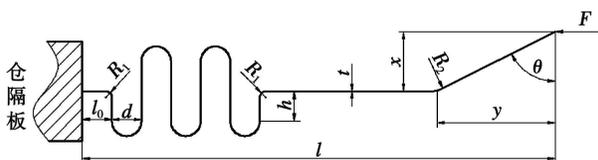


图1 接触式柔性密封示意图

根据接触式柔性密封的结构特点,确定结构参数为:厚度  $t$ 、波距  $d$  (圆弧直径)、波深  $h$ 、初始伸长  $l_0$ 、总长  $l$ 、迎角  $\theta$  (迎角  $x$  值和  $y$  值)、倒角  $R_1$  和  $R_2$ 、载荷外力  $F$ , 如图 1 所示。

## 3 ANSYS 可靠性分析

本研究以接触式柔性密封材料的波松比、弹性模量、屈服极限和密封几何尺寸为随机变量来计算接触式柔性密封结构的可靠性。假设接触式柔性密封的使用过程中,不允许最大应力超过屈服强度的事件发生,如果最大应力超过屈服强度则认为失效,失效准则为:

$$\sigma_{\max} \geq \sigma_y$$

式中:  $\sigma_{\max}$ —接触式柔性密封在使用过程中的最大应力;  $\sigma_y$ —材料的屈服强度。

则极限状态函数为:

$$g(X) = \sigma_y - \sigma_{\max}$$

式中:  $X$ —所有随机变量组成的向量。

$g(X) \leq 0$  为失效状态。因此,接触式柔性密封的可靠性设计,就是求  $g(X) > 0$  的概率。

### 3.1 生产分析文件

#### 3.1.1 确定设计变量并初始化

接触式柔性密封的几何模型,如图 1 所示。选取厚度  $t$ 、波距  $d$ 、波深  $h$ 、初始伸长  $l_0$ 、总长  $l$ 、迎角  $x$  值和  $y$  值、倒角  $R_1$  和  $R_2$ 、波松比  $\nu$ 、弹性模量  $E$ 、屈服极限  $\sigma_y$  作为设计变量并赋予初始值(均值),如表 1 所示。接触式柔性密封模型的宽度取为 0.06 m,最大载荷  $F$  取为 1.31 N,载荷位移最大量取为 0.03 m。

#### 3.1.2 参数化建模、划分网格、加载并求解

利用设计变量的均值进行接触式柔性密封的参数化建模,建立三维立体模型<sup>[7]</sup>,采用 ANSYS 单元库中的壳单元 Shell63,由 ANSYS 自动划分,采用映射分网的方法,获得排列有规则的、疏密大小逐步过渡的四边形网格,如图 2 所示。计算中采用线弹性理论进行分析,物理和几何参数均采用国际单位制进行输入和输出。施加载荷为在接触式柔性密封接触端方向施加均布载荷  $F$ ;边界条件为在接触式柔性密封固定在仓隔板上,施加全约束。设定非线性几何大变形选项。

表 1 接触式柔性密封的均值和标准差

	$t/m$	$d/m$	$h/m$	$l_0/m$	$l/m$	$x/m$	$y/m$	$R_1/m$	$R_2/m$	$\nu$	$E/GPa$	$\sigma_y/MPa$
均值	0.000 2	0.005	0.005	0.005	0.08	0.01	0.02	0.001	0.005	0.27	193	207
标准差	0.000 002	0.000 05	0.000 05	0.000 05	0.000 8	0.000 1	0.000 2	0.000 01	0.000 05	0.002 7	1.93	2.07
变异系数/%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

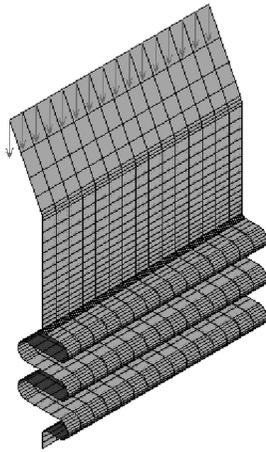


图 2 接触式柔性密封模型图

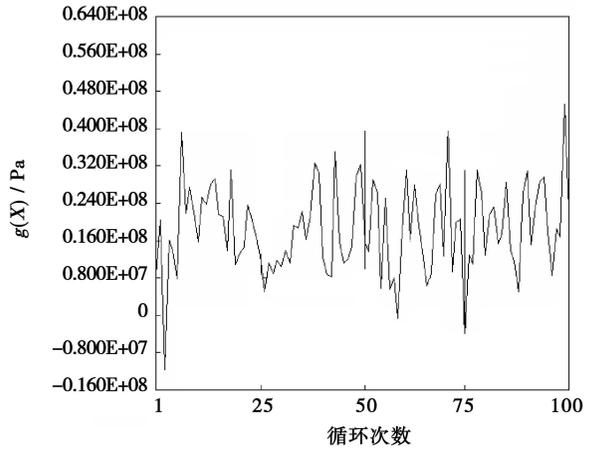


图 3  $g(X)$  的抽样数据图

3.1.3 提取相关结果并存储到参数中

因为接触式柔性密封的主要失效形式为发生塑性变形,故提取接触式柔性密封的最大 Von Mises 等效应力  $\sigma_{max}$ ,并存储到参数表中。设置参数  $g(X) = \sigma_y - \sigma_{max}$ ,用以比较最大应力与屈服强度的大小。

3.1.4 生成概率设计的分析文件

将各条命令流串起来,生成一完整的命令流分析文件并命名,将其作为概率设计的分析文件。

3.2 可靠性设计阶段

进入可靠性设计模块,指定可靠性分析文件。确定输入随机变量为  $t, d, h, l_0, l, x, y, R_1, R_2, \nu, E$  和  $\sigma_y$  等及其正态分布,如表 1 所示;确定输出随机变量为  $g(X)$  和  $\sigma_{max}$ 。选择蒙特卡罗拉丁超立方方法 (Monte Carlo with Latin Hypercube Sampling) 作为概率设计方法。执行概率设计,置信度 (Confidence Level) 为 95%,分析循环次数为 100 次。进入结果后处理,得到可靠性分析结果。

4 结果分析

4.1 概率计算结果

在置信度为 95% 的情形下,  $g(X) < 0$  的概率平均为 3.091 47%,即接触式柔性密封的可靠性为 96.91%,这说明接触式柔性密封是可靠的。

4.2 抽样过程显示

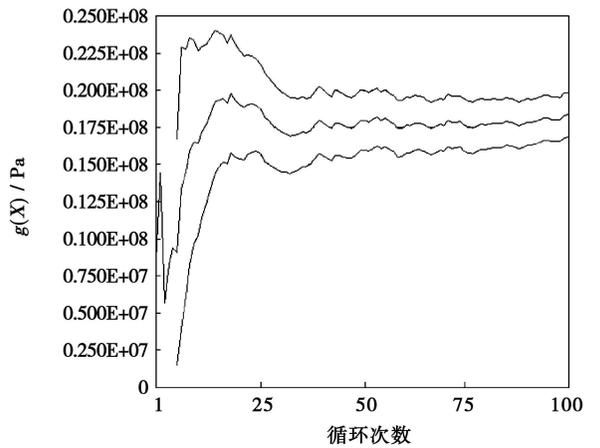


图 4  $g(X)$  的平均值抽样过程

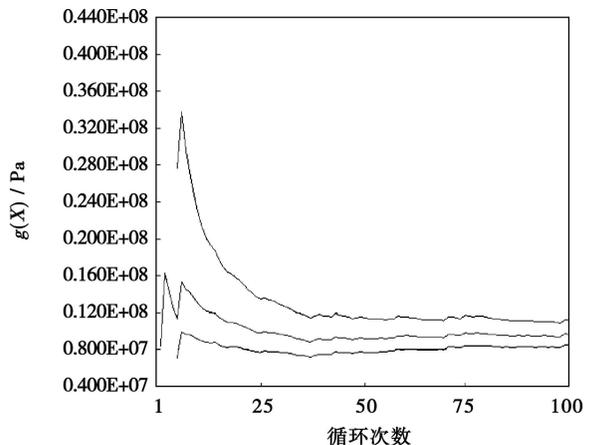


图 5  $g(X)$  的标准差抽样过程

$g(X)$  的样本、平均值和标准差的历史曲线 (置信水平为 0.95), 如图 3~图 5 所示。

如图 3 所示,  $g(X)$  的样本曲线趋向平稳, 说明样本数目足够多。

由图 4 和图 5 可见,  $g(X)$  的平均值和标准差曲线趋向水平, 说明模拟次数足够多。

### 4.3 抽样分布柱状图

接触式柔性密封的屈服强度  $\sigma_y$ 、最大 Von Mises 等效应力  $\sigma_{max}$  和二者之差  $g(X) = \sigma_y - \sigma_{max}$  的抽样分布柱状图, 如图 6~图 8 所示。

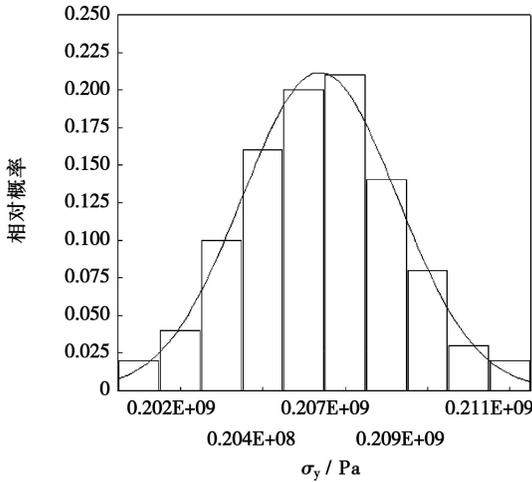


图 6  $\sigma_y$  的抽样分布柱状图

由图 6 可见, 经拟合性检验证明它符合正态分布规律, 屈服强度的取值在 202.18~212.07 MPa, 其均值为 207 MPa, 方差为 2.06 MPa。从图形上看, 柱状图靠近正态分布函数曲线, 不存在跳跃和大的间隙, 说明模拟次数足够多。

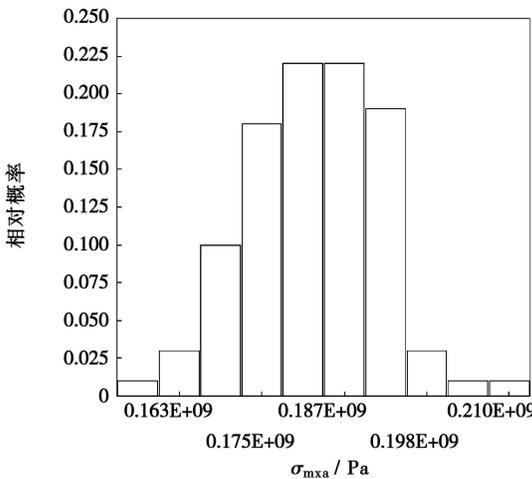


图 7  $\sigma_{max}$  的抽样分布柱状图

由图 7 可见, 最大 Von Mises 等效应力的取值在 163.30~215.53 MPa, 其均值为 188.64 MPa, 方差为 9.45 MPa。

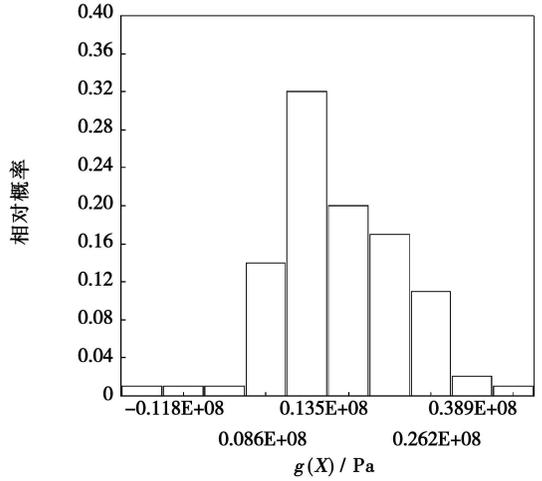


图 8  $g(X)$  的抽样分布柱状图

由图 8 可见,  $g(X)$  的取值在 -11.81~45.19 MPa, 其均值为 18.36 MPa, 方差为 9.62 MPa。

### 4.4 累积分布函数图

累积分布函数是用于查看结构可靠性的工具。累积分布函数在任意点的数值等于数据出现在该点之下的概率值。PDS 可以通过指定概率水平来确定累积分布函数, 以便得到在该概率下概率设计变量的数据。

$g(X)$  在置信度为 95% 的情形下的分布图, 如图 9 所示。最大 Von Mises 等效应力在置信度为 95% 的情形下的分布图, 如图 10 所示。

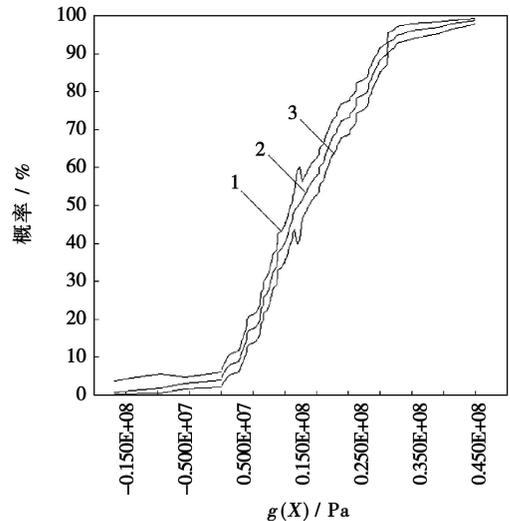


图 9  $g(X)$  的累积分布函数图

由图 9 可见,  $g(X) > 0$  的分布占据主要空间; 2

号线是  $g(X)$  的均值, 1 号和 3 号线分别是它的置信区间的上下限; 在给定置信度为 95% 时,  $g(X) < 0$  的概率小于 10%, 是可靠的。

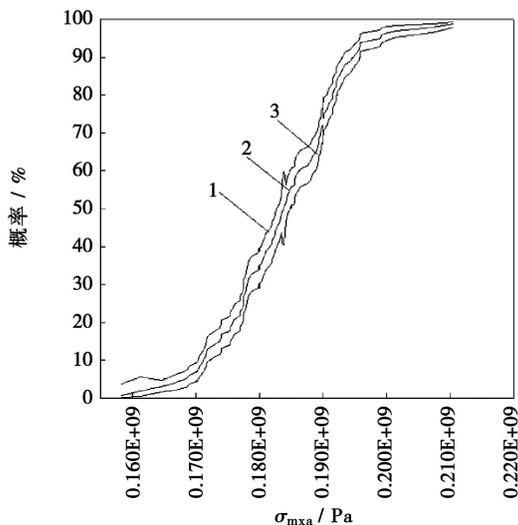


图 10  $\sigma_{max}$  的累积分布函数图

由图 10 可见, 2 号线是最大 Von Mises 等效应力的均值, 1 号和 3 号线分别是它的置信区间的上下限; 在给定置信度为 95% 时,  $\sigma_{max} > 207$  MPa 的概率小于 10%, 是可靠的。根据图 10 (置信水平为 0.95) 对接触式柔性密封在不同概率水平下  $\sigma_{max}$  的限制值如表 2 所示。

表 2 不同概率水平下  $\sigma_{max}$  限制值

概率水平 / %	90	95	99	99.9
限制值 / MPa	$\leq 195$	$\leq 200$	$\leq 210$	$\leq 216$

#### 4.5 设计变量的评定

输出结果可以确定累积分布函数在概率设计变量轴线上任意点的数值, 是评估结构在给定数据处失效概率的有效工具。对接触式柔性密封的各影响因素在给定设计范围内进行评定, 如表 3 所示。各影响因素在实际加工、生产中偏离设计值的概率, 完成对各设计变量的评定。

表 3 影响因素评定表和  $g(X)$  的相关系数

	$t/m$	$d/m$	$h/m$	$l_0/m$	$l/m$	$x/m$	$y/m$	$R_1/m$	$R_2/m$	$\nu$	$E/GPa$	$\sigma_y/MPa$
均值	0.000 2	0.005	0.005	0.005	0.08	0.01	0.02	0.001	0.005	0.27	193	207
设计上限值	0.000 205	0.005 12	0.005 18	0.005 12	0.082 4	0.010 2	0.020 5	0.001 03	0.005 14	0.277	197.66	212.07
设计下限值	0.000 195	0.004 84	0.004 86	0.004 86	0.077 9	0.009 8	0.019 5	0.000 97	0.004 88	0.263	187.71	202.18
失效概率	$2.4 \times 10^{-24}$	0.3	0.12	0.63	0.005 4	0.72	0.29	0.063	0.063	0.69	0.25	0.19
显著性	显著	非显著	非显著	非显著	显著	非显著	非显著	非显著	非显著	非显著	非显著	非显著
相关系数	0.809	0.105	-0.155	0.048	-0.276	-0.036	-0.106	-0.187	-0.187	0.040	0.115	0.132

注: 显著性水平 (Significance level) 为 2.5%。

#### 4.6 灵敏度指标分析

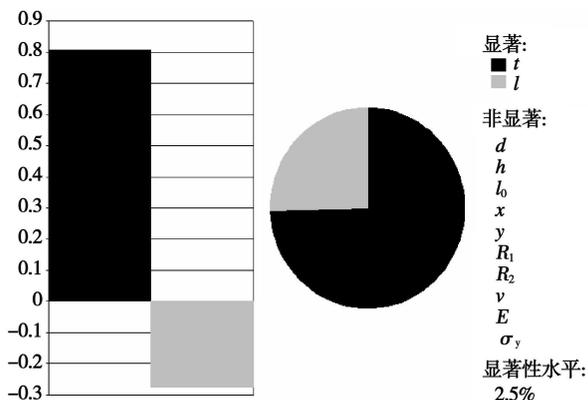


图 11 影响  $g(X)$  的因素示意图

的因素是厚度  $t$  和总长  $l$ 。对于  $g(X)$  的影响, 厚度  $t$  占 74.54%, 总长  $l$  占 25.46%。厚度  $t$  对  $g(X)$  的影响是正值, 即厚度越大,  $g(X)$  越大; 总长  $l$  对  $g(X)$  的影响是负值, 即总长越大,  $g(X)$  越小。因此, 要提高接触式柔性密封的可靠度, 减小最大应力, 应首先控制厚度和总长, 修改不重要的输入变量只是浪费时间。

#### 4.7 $g(X)$ 的相关系数

对于  $g(X)$  的相关系数, 如表 3 所示。对于  $g(X)$  的相关系数, 波深  $h$ 、总长  $l$ 、迎角  $x$  值和  $y$  值、倒角  $R_1$  和  $R_2$  与  $g(X)$  呈负相关, 厚度  $t$ 、波距  $d$ 、初始伸长  $l_0$ 、波松比  $\nu$ 、弹性模量  $E$ 、屈服极限  $\sigma_y$  与  $g(X)$  呈正相关。其中, 厚度  $t$ 、总长  $l$  与  $g(X)$  呈显著相关, 且相关程度最大, 与灵敏度指标分析结果相一致。与  $g(X)$  的相关系数相对应, 厚度  $t$ 、总长  $l$  对于  $g(X)$  的失效概率最小。

影响屈服强度与最大 Von Mises 等效应力之差  $g(X)$  的灵敏度指标分析, 如图 11 所示。影响  $g(X)$

## 5 结 论

(1) 采用 ANSYS/PDS 模块中的蒙特卡洛拉丁超立方方法进行了可靠性分析, 设置了 100 次分析次数, 在接触式柔性密封满足屈服强度和工作位移量的前提下, 得到分析结果。

(2) 在置信度为 95% 的情形下, 接触式柔性密封的可靠性为 96.91%, 这说明接触式柔性密封的结构尺寸是合理的。

(3) 得到了接触式柔性密封的各结构参数的设计范围; 最大 Von Mises 等效应力的影响因素是波厚  $t$  和总长  $l$ , 其中波厚  $t$  的影响最大, 其次是总长  $l$ ; 波厚  $t$  对最大 Von Mises 等效应力的影响是负向的, 总长  $l$  对最大 Von Mises 等效应力的影响是正向的。

(4) 利用 ANSYS 的概率分析功能, 并编制 APDL 命令流对接触式柔性密封进行可靠性设计, 大大提高了设计效率。通过修改相关参数, 可将这种方法应用于相同类型的接触式柔性密封设计, 具有一定的普遍意义。

(5) 本文说明利用 ANSYS 的概率分析功能进行结构的可靠性分析是可行的, 其方法简单、避免了大量实验、节约了资源, 是有限元理论和可靠性理论的有机结合, 为复杂结构的可靠性分析提供了新的方法。

### 参考文献:

- [1] 国家电力公司电力机械局, 中国华电工程(集团)公司, 中电联标准化中心. 电站锅炉空气预热器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005
- [2] 吴光明, 方世清. 回转式空气预热器密封间隙控制系统改造[J]. 热力发电, 2002(1): 56-58
- [3] 刘贵锋. 回转式空气预热器密封形式的改进[J]. 热动力工程, 2004, 16(2): 208-209
- [4] 胡兰海, 赵文军, 张燕飞, 等. 回转式空气预热器双密封节能改造[J]. 热动力工程, 2005, 20(2): 208-210
- [5] 王庆峰, 何立东, 张强. 回转式空气预热器接触式柔性密封模拟分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(20): 66-71.
- [6] 余伟炜, 高柄军. ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M]. (第二版)北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [7] 段进, 倪栋, 王国业. ANSYS 10.0 结构分析从入门到精通[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006.

(编辑 滨)

### 新技术、新工艺

## 荷兰壳牌煤气化技术用于中国生产甲醇

据《Gas Turbine World》2008年11~12月号报道, Royal Dutch Shell(荷兰壳牌)宣布了 SCGP(壳牌煤气化过程)技术的3个新的许可证协议, 该公司用于中国气化项目的许可证总数达19个

新的第一份协议是给予云南永泰华(音译)公司二次许可证, 以便将壳牌技术用于该公司的水富项目, 使用煤作为原料每年生产260 000 t 甲醇。该公司于2003年从壳牌公司得到了第一次 SCGP 许可证, 用于它的天南(音译)项目, 年产500 000 t 氨的装置目前正在运行中。

与大同煤矿的第三个新的 SCGP 许可证协议于2008年9月开始生效。该协议为大同煤矿计划的每年600 000 t 煤转换成甲醇的项目铺平了道路。

壳牌公司基本的气化过程由三个要素组成:

(1) 气化(部分氧化): 在一个衬有耐火材料的气化反应器内, 存在氧和减速剂(蒸汽)的情况下, 把原料(煤)转变成合成气。

(2) SEC(合成气冷却器): 用离开反应器的热合成气产生高压蒸汽。

(3) 除碳: 在一个二级水洗装置中从合成气除去残留的碳和灰分。

(吉桂明 摘译)

that through a modulation and demodulation process combined with the action of a filter, the derivative featuring the change in relative settings of performance indexes is estimated and then a local optimum solution can be obtained by using a gradient method. Subsequently, the authors have proposed a method for the basic structure and parameter setting of a combustion optimization control system based on the extremum-search control. The simulation results of an air-feeding control system show that the combustion optimization tactics not only can successfully make the system attain its optimum oxygen-content target and realize an optimization of combustion but also as a closed loop and on-line optimization method can enable it to better adapt to such disturbances as load variation and air leakage, etc. **Key words:** utility boiler, combustion optimization, extremum-search control, air/coal ratio control

回转式空气预热器接触式柔性密封可靠性设计 = **Reliability Design of a Contact Type Flexible Seal for Rotary Air Preheaters** [刊, 汉] / WANG Qing-feng, HE Li-dong (Research Center of Diagnosis and Self-healing Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China, Post Code: 100029) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 470 ~ 475

Contact type flexible seal is a new technology for solving the air leakage problem of rotary air preheaters. Reliability is an important index for contact type flexible sealing performance. The authors have described the reliability design method based on ANSYS. By utilizing the PDS module of ANSYS and combining the finite element method with the reliability design theory, a model for the contact type flexible seal was established with three-dimensional parameters and an APDL instruction stream, formulated. A reliability analytic document was prepared to conduct a reliability design of the contact type flexible seal. Under the condition of a confidence level being assessed at 95%, the reliability of the contact type flexible seal attains 96.91%. It has been found that the structure of the contact type flexible seal is reliable. The design range of various structural parameters were obtained. The wave thickness and total length constitute the main factors affecting the contact type flexible seal. The foregoing can well provide a definite reference for the design and study of contact type flexible seals. **Key words:** rotary air preheater, contact type flexible seal, reliability design, ANSYS/PDS

基于模糊规则和支持向量机的凝汽器故障诊断 = **Diagnos of Condenser Faults Based on Fuzzy Rules and a Supportive Vector Machine** [刊, 汉] / WANG Lei, ZHANG Rui-qing, SHENG Wei (Department of Power Engineering, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, China, Post Code: 110136), XU Zhi-hao (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(4). — 476 ~ 480

The algorithm of decision-directed acyclic graph supportive vector-machine (DDAGSVM) represents a multiple classification method established by introducing the directed acyclic graph ideology of graph theory on the basis of the supportive vector machine 1-v-1 algorithm. It combined two kinds of multiple supportive machine 1-v-1 classifiers into a multiple layer directed acyclic decision-making chart with root nodes to realize a classification. It is built on the minimum structure risk theory and can attain an excellent classification effectiveness under the condition of relatively less training specimens. On the basis of summarizing commonly seen faults of steam turbine condensers, a typical fault set was established and a fault omen repository, acquired through fuzzy rules. A study was conducted of the use of DDAGSVM algorithm for diagnosing typical faults of condenser equipment items under the condition of small specimens. The example calculation results show that the DDAGSVM algorithm enjoys a relatively high diagnosis accuracy. **Key words:** steam turbine, condenser, fuzzy rule, supportive vector machine, fault diagnosis

基于运行模式识别的球磨机自适应解耦模糊控制与仿真 = **Self-adaptive Decoupling Fuzzy Control and Simulation of Ball Mills Based on Operating Pattern Identification** [刊, 汉] / WANG Heng, JIA Min-ping (College of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 211189), CHEN Zuo-liang, XIE Chao (Datang