

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.020

涡旋压缩机异形封头可靠性设计

周到, 贾磊, 胡继孙, 杨坤

(合肥通用机械研究院, 安徽 合肥 230031)

摘要:为评估异形封头结构在涡旋压缩机运行过程中的可靠性,参考压力容器椭圆形封头设计理论,采用常规设计方法对封头进行了结构设计和强度校核;基于封头材料性能、结构尺寸等设计参数的分散性,将各参数作为正态分布的基本变量,对封头结构进行了可靠性设计,并对基本变量分布参数的灵敏度进行分析。计算结果表明,与常规设计方法相比,可靠性设计在确保结构安全性的前提下,同时保证了设计的经济性;影响封头可靠度的主要因素是材料屈服极限、工作压力和壁厚。

关键词:涡旋压缩机;封头设计;可靠性;灵敏度;有限元分析

中图分类号:TB114.32

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)02-0082-04

Reliability Analysis of Special Head of Scroll Compressor

ZHOU Dao, JIA Lei, HU Jisun, YANG Kun

(Hefei General Machinery Research Institute, Hefei 230031, China)

Abstract:In order to evaluate the reliability of the special head in the scroll compressor running process, structural design and strength analysis of the head was accomplished by the reference of conventional design theory of pressure vessel head. Due to parameter uncertainty of material performance, structure size and so on, each parameter was expressed as the basic random variable of the normal distribution function. The reliability analysis of the head and the sensitivity analysis of parameters were carried out. The analytical results show that the reliability design ensures structure reliability and economical efficiency. The strength of the material, load and thickness of the wall has great influence on reliability of the head.

Key words:scroll compressor; head design; reliability; sensitivity; finite element analysis

采用常规设计方法在进行结构设计时,将载荷、材料性能参数等均视为确定值,所得设计结果也是确定的,无法反映出结构的安全程度。而机械可靠性设计方法考虑了各设计参数的分散性^[1-2],结合概率与数理统计理论及强度理论,从而得到结构的安全性评价结果。

涡旋压缩机封头属于承压元件,在运行过程中承受气体压力。封头结构与压力容器椭圆形封头近似,但由于结构布局的特殊性,两者又有所区别。因此在设计中参考了压力容器椭圆形封头设计理论,确定了封头结构参数,并在此基础上考虑结构参数、材料性能参数等的分散性,对封头进行可靠性分析^[3-5],得到了封头在各参数随机性影响下的可靠度;并对可靠性设

计的灵敏度进行了分析,计算结果为封头结构的进一步优化设计提供了理论指导。

1 机械可靠性设计理论

分析一个零件的可靠性^[6],可通过判断其应力和强度的大小关系来实现。当应力值大于强度值时,零件失效;当应力值小于强度值时零件可正常工作。应力值小于强度值的概率 P 即为零件的可靠度 R ,可由下式表示:

$$R = P(\sigma < \delta) = P[(\delta - \sigma) > 0]$$

式中: σ 为应力, δ 为强度。

零件的强度与应力均为连续变量,当应力与强度均呈正态分布时,其概率密度函数分别为:

收稿日期:2014-10-09;修回日期:2014-12-24

基金项目:安徽省科技攻关计划项目:节能环保型热泵用CO₂涡旋压缩机的研发(1301022072)

作者简介:周到(1973),男,安徽明光人,工学博士,高级工程师,主要从事制冷设备及系统的研究工作。E-mail:476703638@qq.com

$$f(\sigma) = \frac{1}{S_\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma - \mu_\sigma}{S_\sigma}\right)^2\right],$$

$$g(\delta) = \frac{1}{S_\delta \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\delta - \mu_\delta}{S_\delta}\right)^2\right].$$

式中: μ_σ, μ_δ 分别为应力 σ 和强度 δ 的均值; S_σ, S_δ 分别为应力 σ 和强度 δ 的标准差。

令 $y = \delta - \sigma$, 则可靠度 R 可表示为

$$R = P(y > 0) = \int_0^\infty \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y - \mu_y}{S_y}\right)^2\right] dy. \quad (1)$$

式中: μ_y 为变量 y 的均值, S_y 为变量 y 的标准差。

令 $Z = \frac{y - \mu_y}{S_y}$, 根据式(1)求解可得可靠度

$$R = \varphi(Z_R),$$

$$\text{可靠度指数 } Z_R = \frac{\mu_y}{S_y} = \frac{\mu_\delta - \mu_\sigma}{\sqrt{S_\delta^2 + S_\sigma^2}}.$$

由可靠度指数公式可以看出, 当强度和应力的标准差值减小, 而均值保持不变时, 零件的可靠度增加。相比较于常规设计方法, 可靠性设计方法更全面地反映了设计参数变化对零件可靠性的影响。

2 封头确定性有限元分析

2.1 封头壁厚的确定

某型涡旋压缩机封头结构形式如图 1 所示^[7-8], 其中 $R = 33 \text{ mm}$, $L = 50.5 \text{ mm}$, $h = 7 \text{ mm}$ 。封头材料屈服极限 345 MPa, 弹性模量 200 GPa, 泊松比 0.3, 许用应力值为 189 MPa, 计算压力 14 MPa。

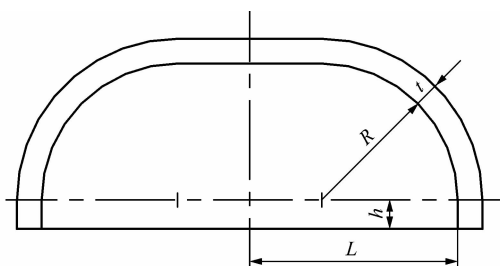


图 1 封头结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of head

由于此封头结构与压力容器椭圆形封头结构类似, 此处参照 GB150.3-2011 中椭圆形封头设计方法, 初步确定涡旋压缩机封头壁厚。受内压椭圆形封头计算厚度 t 为

$$t = \frac{2KpL}{(2 \times [\sigma] \times n - 0.5p)} + C \quad (2)$$

式中: t 为壁厚/mm; p 为内压/Pa; $[\sigma]$ 为许用应力/Pa; n 为焊缝系数, 此处取 0.9; C 为壁厚附加值/mm,

此处取值为 1 mm。 K 为形状系数, 表达式为

$$K = \frac{1}{6} \left[2 + \left(\frac{L}{2R} \right)^2 \right].$$

代入结构尺寸和材料性能参数, 考虑钢板厚度负偏差 0.5 mm, 并向上圆整至钢板标准规格, 此处取封头壁厚度为 6 mm。

2.2 有限元分析

依据封头结构尺寸, 考虑涡旋压缩机封头的轴对称性, 在 ANSYS 中建立其几何模型^[9], 采用轴对称单元 Plane82 划分网格, 建立封头的二维有限元模型如图 2 所示。

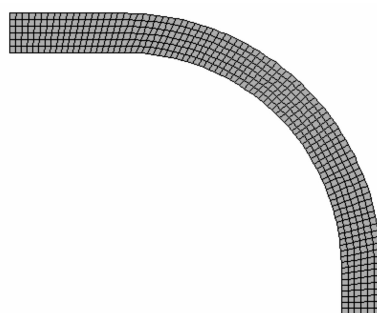


图 2 封头有限元模型

Figure 2 Finite element model of head

在封头内表面施加 14 MPa 均布压力, 约束封头底边自由度, 约束对称边 x 向位移, 考查封头在确定参数下的应力水平, 封头应力云图如图 3 所示。由应力图可知, 封头最大应力值发生在封头顶部, 最大应力值为 275 MPa, 小于封头材料的屈服极限值, 但却超出了封头材料许用应力值。由于封头结构内腔结构尺寸已确定, 因此在常规设计方法下保证封头结构在压缩机运行过程中的可靠性需要通过增加封头壁厚来实现。

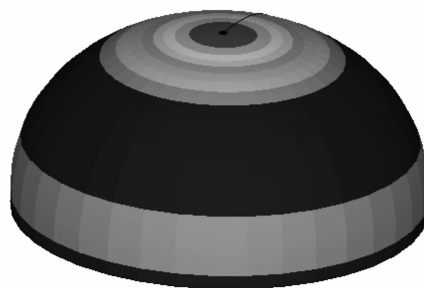


图 3 封头应力图

Figure 3 Stress diagram of head

3 封头随机有限元分析

涡旋压缩机封头载荷、结构尺寸及材料性能参数等所具有的分散性会对封头的应力状态产生影响, 此处所有参数均服从正态分布, 其分布情况如表 1 所示。

表1 参数正态分布均值及方差

Table 1 Normal distribution mean and variance of parameters

均值					标准差				
封头底部 半径 L/mm	壁厚 t/mm	工作压力 p/MPa	极限应力 S/MPa	封头顶部 半径 R/mm	封头底部 半径 L/mm	壁厚 t/mm	工作压力 p/MPa	极限应力 S/MPa	封头顶部 半径 R/mm
50.5	6.0	14	345	33.0	0.25	0.10	0.5	25	0.15

由此可定义功能函数为

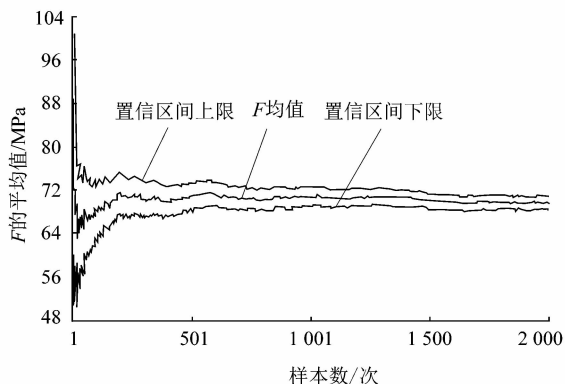
$$F(x) = S - S_{\max}$$

式中: S 为极限应力, $S_{\max}$ 为最大等效应力值。

若 $F(x) > 0$, 则极限应力值大于结构的最大等效应力值, 结构安全; 若 $F(x) < 0$, 则极限应力值小于结构的最大等效应力值, 结构失效。

3.1 可靠度求解

解决结构可靠度问题的常用方法有蒙特卡洛法和响应面法等。蒙特卡洛法适用面广, 只要建模准确, 模拟次数足够多, 所得结果就可认为可信。此处采用蒙特卡罗法进行可靠性分析, 定义抽样次数为 2 000 次, 输出变量抽样过程如图 4 所示。由图 4 可知输出变量平均值趋向收敛。这表明采用 2 000 作为蒙特卡罗法的循环次数是足够的, 结果可信。

图4 F 抽样过程显示Figure 4 F sampling process display

运行封头可靠度计算, 可查看可靠度计算结果, 如 $F(x) < 0$ 且置信度为 95% 时, 概率为 0.64%, 即封头可靠度为 99.36%, 已经能够满足结构安全性要求^[10]。在封头壁厚没有增加的情况下, 将依据可靠性方法得出的结论与依据常规设计方法得出的结论相比较, 显然后者更趋于保守。

3.2 灵敏度求解

输出变量灵敏度分析结果如图 5 所示。其中, 输入变量对输出变量影响水平在 2.5% 以上的归为有显著影响的因素。输入变量在饼状图中所占面积大小代表了对输出变量的影响程度, 面积越大, 输入变量对输

出变量的影响程度越大。由图中可知, 在上述给定条件下, 对封头可靠度影响最大的前 5 个参数分别为材料强度、工作压力、壁厚、封头底部半径以及封头顶部半径。此分析结果指出了在设计和加工过程应重点考虑的影响结构安全性的因素。

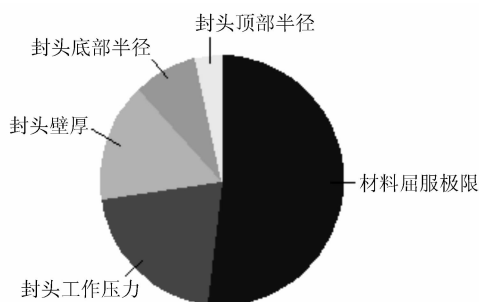


图5 灵敏度分析

Figure 5 Sensitivity analysis

4 结论

在涡旋压缩机异形封头结构设计中, 采用常规设计方法可以保证结构的安全性, 但结果偏于安全, 经济性较差; 采用可靠性设计方法, 既能满足结构的安全性要求, 又节约了产品的成本。且通过对功能函数的灵敏度分析, 得到了各参数对结构的可靠度影响程度, 为封头结构的进一步优化设计提供了指导。

针对无规范可供参考的异形封头结构设计, 文中采用的设计方法可为相关结构的设计提供一条切实可行的途径, 具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 高宗战, 刘志群, 姜志峰, 等. 飞机翼梁结构强度可靠性灵敏度分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 194-198.
- [2] 刘有艳, 周昌玉. 压力容器接管部位的可靠性设计研究[J]. 压力容器, 2011, 28(1): 18-22.
- [3] 牛亚平, 王小华, 陈冰冰, 等. 囊式蓄能器壳体静力强度可靠性分析[J]. 轻工机械, 2013, 31(6): 83-86.
- [4] 石佳睿, 唐文勇. 载人深潜器钛合金耐压球壳极限强度可靠性分析[J]. 船海工程, 2014, 43(2): 114-118.
- [5] 唐勇, 贺小华. 试验压力下带接管外压容器的可靠性分析[J]. 轻工机械, 2012, 30(2): 97-99.
- [6] 杨瑞刚. 机械可靠性设计与应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 40-43.

(下转第 88 页)