

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-739-07

空调压缩机曲轴的可靠性设计分析

朱红伟¹ 迟莹² 李红旗³ 雷一鸣³ 刘旺旺³

(1. 珠海格力电器股份有限公司 珠海 519070;

2. 中国核电工程有限公司 北京 100840;

3. 北京工业大学环境与生命学部 北京 100124)

【摘要】 压缩机传统曲轴设计往往采用安全系数法以保证可靠度达到要求。但这种做法没有考虑到材料性能的离散性、载荷应力的随机性以及零件应力、强度等参数的变化,且安全系数选取往往有较大的主观随意性,导致过度设计。基于可靠性建模及分配,以压缩机典型结构曲轴为例,采用可靠性概率设计法进行结构设计,编写计算机辅助设计软件并分析不同因素对曲轴设计结构、曲轴可靠度的影响。研究表明可靠性设计是一种更为合理、科学的压缩机设计方法,疲劳强度、扭转力矩标准差和剪切应力变异系数对可靠性设计具有更大的影响。长期以来对压缩机可靠性设计的研究较少、基础比较薄弱,本研究可为压缩机设计由经验设计转向更为合理科学的可靠性设计提供参考,在当前空调压缩机巨大制造规模的情况下,具有积极的现实意义。

【关键词】 压缩机; 曲轴; 可靠性; 概率设计

中图分类号 TB652 文献标识码 A

Reliability Design and Analysis of Crankshaft of Air Condition Compressor

Zhu Hongwei¹ Chi Ying² Li Hongqi³ Lei Yiming³ Liu Wangwang³

(1. Gree Electric Appliances, Inc. of Zhuhai, Zhuhai, 519070; 2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing, 100840;

3. Beijing University of Technology, Department of Environment and Life Science, Beijing, 100124)

【Abstract】 The traditional crankshaft design of compressor usually adopts the safety factor method to ensure the reliability to meet the requirements. However, this approach ignores the discreteness of material properties, the randomness of load stress and the changes of part stress, strength and other parameters. The selection of safety factor is highly subjective and arbitrary, and will lead to over-design. In this paper, based on reliability modeling and distribution, taking typical compressor structure crankshaft as an example, the reliability probability design method was adopted to carry out structural design, the computer aided design software was written and the influence of different factors on the crankshaft design structure and crankshaft reliability was analyzed. The research results shows that reliability probability design is a more reasonable and scientific approach in compressor design, fatigue strength, standard deviation of roll torque and variation coefficient of shearing stress play more important roles in the reliability probability design of a compressor. In consideration of the weak research foundation in the reliability design of compressors in the past and the huge production capacity, the research in this paper will be helpful and useful for the compressor design transferring from empirical design to reliability design.

【Keywords】 compressor; crankshaft; reliability; probability design

作者简介: 朱红伟 (1968.8-), 女, 学士, 高级工程师, E-mail: zhwygq@126.com

通讯作者: 迟莹 (1992.2-), 女, 硕士, E-mail: chiyingbjut@163.com

收稿日期: 2021-11-16

0 前言

曲轴是压缩机实现旋转运动的执行件，工作状态比较恶劣，承受高温、交变作用力，是压缩机薄弱环节之一，其故障将导致压缩机失效。传统的曲轴设计往往采用安全系数法，为保证其可靠性，一般取较大的安全系数导致过度设计，造成浪费。

目前针对曲轴的研究主要集中在以下几个方面：建立多体动力学模型^[1,2]、编译程序使设计参数可视化^[3,4]、有限元法与多体动力学结合^[5,6]、ADAMS 仿真模拟^[7]等。对应力和强度等设计参数离散性的影响考虑较少，在可靠性设计方面研究较少、基础比较薄弱。考虑到每年约 2 亿台的制造规模，开展可靠性概率设计是十分必要的。

可靠性概率设计对传统的设计内容赋予概率的意义，是将应力分布、强度分布和可靠度（或其他主要可靠性标志）在概率的意义下联系起来，构成一种设计计算的判据，从而可根据产品设计时的可靠性指标要求，确定其满足设计要求所需要的结构尺寸和材料性能。因此，可靠性概率设计是压缩机曲轴可靠性设计的一种有效方法^[8]。

本文基于可靠性概率设计相关理论，在曲轴失效形式分析的基础上，对其进行尺寸设计，开

发相关辅助软件并分析不同因素对曲轴设计半径和可靠度的影响。

1 压缩机典型曲轴结构

图 1 所示为某压缩机典型曲轴的结构及危险截面的受力情况。该曲轴具有两个曲柄销，用于双转子式空调压缩机。双转子式压缩机具有单机容量大、惯性力平衡性好、适用于变频技术等优势，已是目前市场上的主流结构形式。曲轴由位于 F_1 和 F_2 截面的两个轴承支撑，左侧部分与电动机转子过盈配合连接、由电动机驱动旋转。其作用是传递电动机的动力、由右侧的两个错角 180 度的偏心曲柄销驱动转子在气缸中旋转。曲轴的作用单一、不同型号的结构变化和尺寸差异不大，所使用的材料一般均为粉末冶金或铸铁。而全封闭空调压缩机仅用于空调器，其使用条件、负荷变化等运行特性也比较相似。

通过对曲轴的分析可知 1-1 截面处易发生疲劳断裂，为其危险截面。曲轴所受的力包括：轴承支撑力 $|F_1|=|F_2|=11.9798\text{N}$ ，偏心轮所受合力的径向分力 $F_{re}=26.0133\text{N}$ ，轴向分力为 F_{be} ； $a=c=20.5\text{mm}$ 为轴承中部距偏心部中部距离， $b=35.0\text{mm}$ 为两偏心轮中部距离。

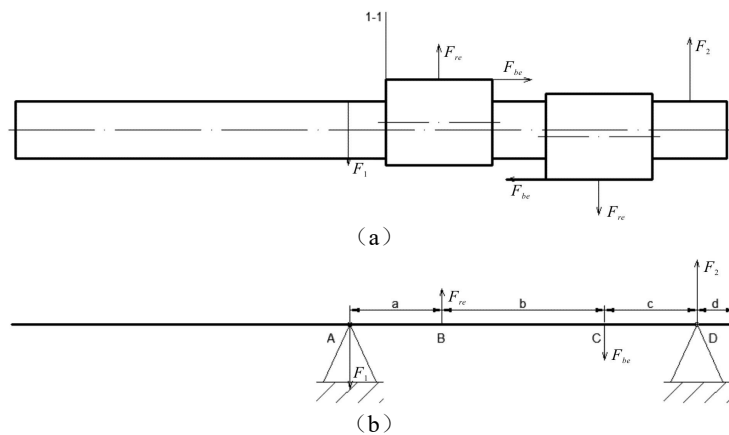


图 1 曲轴结构及受力简化示意

Fig.1 Simplified schematic of crankshaft structure and stress

2 曲轴失效分析

在对曲轴进行可靠性设计之前，需要对其失效形式进行分析，针对不同的失效形式，采用不同的概率可靠性设计模型计算关键尺寸参数。

考虑到工作环境、运行状态，曲轴的主要失效形式为^[9]：

(1) 塑性变形和高温蠕变。前者是在设计计算以及选择材料时考虑不当，后者是载荷和温度的共同影响产生的。

(2) 断裂。根据断裂发生的条件和原因不同，可分为静载断裂、疲劳断裂以及高温蠕变开裂。静载断裂是由于加载在曲轴上的作用力比较大，

危险截面的最大工作应力超过了材料的强度极限而发生的一种曲轴失效形式; 疲劳断裂是因为由于曲轴的结构特征而导致产生了应力集中部位, 这些部位在外部交变作用力下就会产生疲劳裂纹, 随着曲轴长时间的工作以及周围环境如润滑油的影响, 疲劳裂纹会扩大, 当达到一定程度时曲轴就会在疲劳裂纹产生处发生断裂。曲轴的疲劳断裂由于具有发生缓慢且不可预估性, 使得这种失效形式造成的影响及损失更大; 高温蠕变开裂是因为曲轴工作的环境温度较高, 而在长期的交变载荷作用下, 曲轴会发生过程缓慢而持续的塑性变形, 这就会影响与之配合的零部件的预紧力并使之降低, 从而导致零件掉落甚至开裂。

(3) 磨损失效。由于曲轴在旋转过程中与其他零件如轴承、转子等的接触, 使曲轴表面、轴承内圈、转子内壁等发生摩擦现象, 进而造成磨损现象。磨损会使曲轴轴径减小、表面精度下降, 曲轴所能承受的应力降低, 从而导致失效。

可通过以下几个方面入手, 避免曲轴失效情况的产生: 在曲轴的设计计算过程中, 充分考虑强度、载荷的影响; 选用性能较好的材料; 改善曲轴上应力集中状况; 对曲轴表面进行适当的处理, 改善粗糙度, 增强耐磨度等。

3 曲轴可靠性设计

3.1 可靠性概率设计基本原理与方法^[10]

在可靠性设计中的基本假设:

(1) 假设零件在设计中的应力参量, 如载荷、零部件尺寸等影响因素都是随机变量, 且服从某一中随机分布, 并且可以求得在多因素影响下的

应力分布。

(2) 假设零件在设计中的强度参量, 如材料的机械性能、零件尺寸、结构形式、加工精度等影响因素也都是随机变量, 并且可以求得在多因素影响下的强度分布。

(3) 机械设计中, 强度和应力具有相同的量纲, 所以可以根据这两个假设并应用概率统计方法将应力分布和强度分布在一个坐标系中联系起来。

设应力为 x_l , 强度为 x_s , 则不管应力和强度服从何种分布, 当应力大于强度 $x_l > x_s$ 时, 结构就会遭到破坏; 当强度大于应力 $x_s > x_l$ 时, 结构可靠; 所以, 干涉模型下的产品可靠度为强度大于应力的概率, 即 $R = P(x_s > x_l)$ 。

对于整个应力分布, 强度大于应力的概率即为产品实际使用的可靠度 R 。故

$$R = \int dR = \int_{-\infty}^{\infty} f_l(x_l) \cdot \left[\int_{x_l}^{\infty} f_2(x_s) dx_s \right] dx_l \quad (1)$$

当应力分布 $f_l(x_l)$ 和强度分布 $f_2(x_s)$ 已知时, 即可计算出产品的可靠度。

概率可靠性设计法是可靠性设计的主要方法之一, 在传统设计法的基础上采用了概率论的相关理论以改善传统设计法将设计变量视为定量这一不足问题。概率可靠性设计包括静强度概率可靠性设计和疲劳强度概率可靠性设计两部分。本文基于概率可靠性设计的基本理论和方法编写了压缩机曲轴概率可靠性设计的辅助软件。

曲轴设计目标可靠度为 0.99920, 在此条件下进行曲轴危险截面主轴颈的直径设计 (假定各段主轴颈半径相同)。

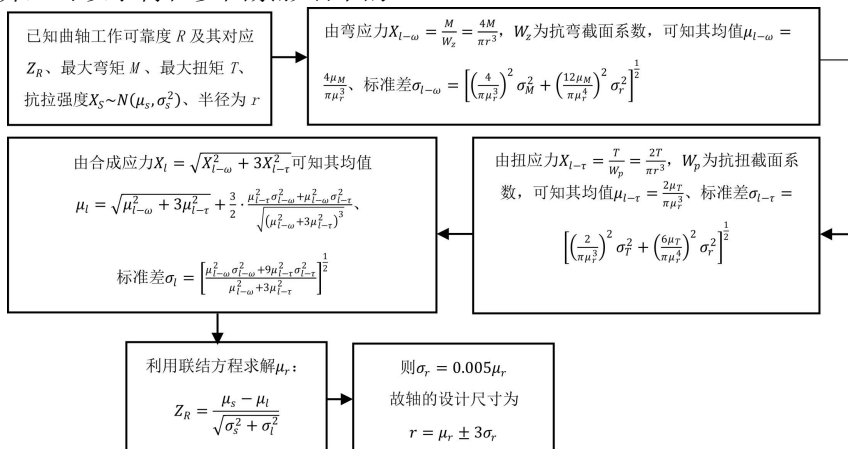


图 2 曲轴静强度可靠性设计流程图

Fig.2 Flowchart of crankshaft static strength reliability design

(1) 静强度的可靠性设计程序

在载荷波动很小时采用静强度可靠性设计，计算过程如图 2 所示。其中， μ_s 和 σ_s 是 x_s 的均值和标准差， μ_r 和 σ_r 是 r 的均值和标准差， μ_M 和 σ_M 是 M 的均值和标准差， μ_T 和 σ_T 是 T 的均值和标准差；选取半径 r 的公差 $\Delta = 0.015\mu_r$ ，则 $\sigma_r = 0.005\mu_r$ 。

(2) 疲劳强度的可靠性设计程序

当考虑曲轴的疲劳强度概率可靠性设计时的过程如图 3 所示。根据材料的性能，选取材料的疲劳极限的变异系数 $C_{\sigma-1}$ ，强度极限的变异系数 C_{σ_b} ；假定弯曲应力的变异系数 C_σ ，剪切应力的变异系数 C_τ 。根据轴的结构、尺寸和加工状况，确定有效应力集中系数 K_σ 的均值 μ_{K_σ} ，表面加工系数 β 均值 μ_β ，尺寸系数 ε 均值 μ_ε 。最大应力： $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ ，最小应力： $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ ，其中， $\sigma_m = \mu_{\sigma_m}$ ， $\sigma_a = \mu_{\sigma_a}$ 。A 点 $r = -1$ ，

$\sigma_a = \sigma_{-1} = \mu_{(\sigma_{-1})d}$ ，B 点 $r=1$ ， $\sigma_m = \sigma_b = \mu_{\sigma_b}$ ，连接 A 和 B；在直线 AB 的基础上减去相应的 3 倍的标准差而得到直线 A_1B_1 ；在该线图内，由原点作射线 OM，与水平轴夹角 α ，OM 与直线 AB 和直线 A_1B_1 分别交于 C 和 C_1 点，计算可得两点坐标分别为 $C(x_c, y_c)$ MPa， $C_1(x_{c1}, y_{c1})$ MPa。

3.2 可靠性概率设计与传统设计对比

在可靠度为 0.99920 的前提下，按照概率可靠性设计得到的主轴颈最小直径为 6.2mm，远小于按照安全系数法设计的曲轴直径 20mm，显然，常规设计存在明显的过度设计问题。

在可靠性设计过程中，融入了概率统计的理念：考虑了零部件的材料强度、载荷或应力的随机性和离散性，因此，无论是从零部件实际的环境状态还是运行特性，可靠性设计方法都会比传统设计法更符合实际状况。当然，可靠性设计结果是压缩机零件的最低要求，实践中还需要考虑诸如结构的可行性等其他因素，曲轴的直径从制造工艺等方面考虑无疑需要放大。

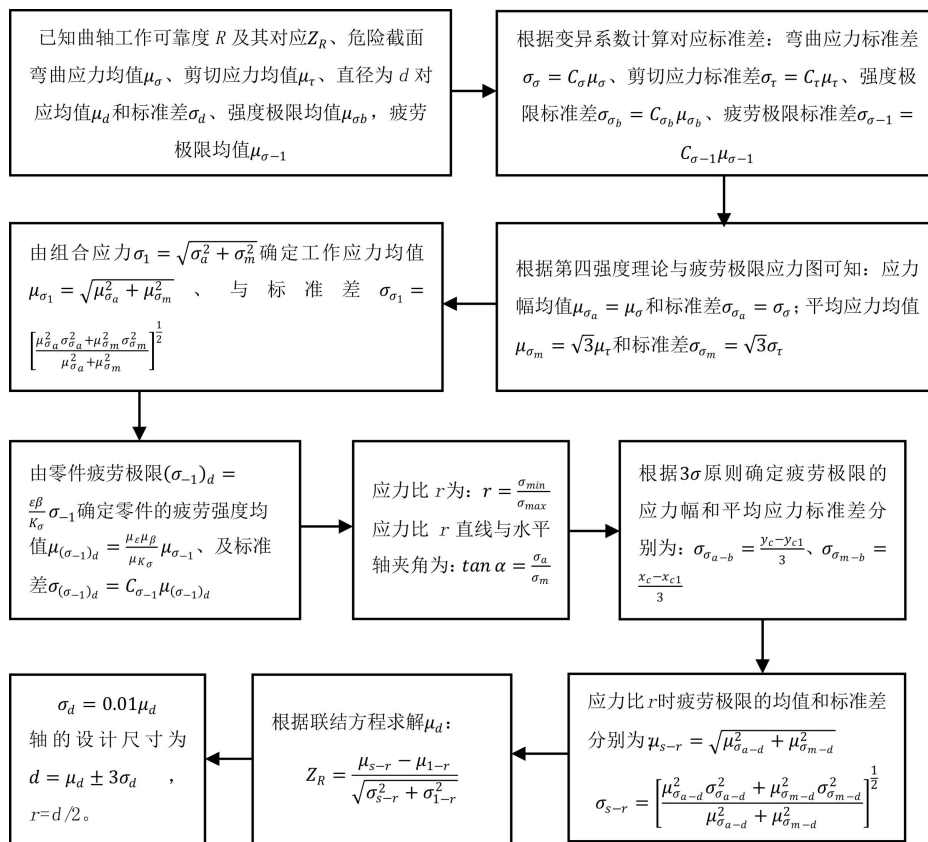


图 3 曲轴疲劳强度可靠性设计流程图

Fig.3 Reliability design flow chart of crankshaft fatigue strength

4 不同因素对曲轴设计半径和可靠度的影响

4.1 不同因素对曲轴设计半径的影响

以转子式压缩机曲轴的概率可靠性设计作为参考对象, 分析不同因素: 设计可靠度、材料强度离散性、应力分布随机性、变异系数对其设计半径的影响。

4.1.1 设计可靠度

设计可靠度是指零件要求达到的设计目标在其他条件不变的情况下, 只改变曲轴目标可靠度 R 和可靠度系数 Z_R 对可靠性设计半径的影响如图 4 所示, 其中实线为静强度可靠性设计结果, 虚线为疲劳强度可靠性设计结果。从图中可知, 随着曲轴设计可靠度的增大, 设计半径的尺寸增大; 在可靠度小于 0.99900 前, 增加速率增大, 可靠度大于 0.99900 后, 增加速率减小; 过高的可靠度将导致曲轴设计半径的急剧增加。

与静强度相比, 疲劳强度对设计结果具有更大的影响。疲劳强度设计半径大于静强度设计半径, 当设计可靠度从 0.99999 降为 0.95000 时, 半径尺寸增加了 11.87%, 相同情况下的静强度设计半径尺寸仅增加了 2.41%。曲轴疲劳破坏是其主要的失效模式, 一般不会发生静强度破坏, 应该按照疲劳强度进行可靠性设计。

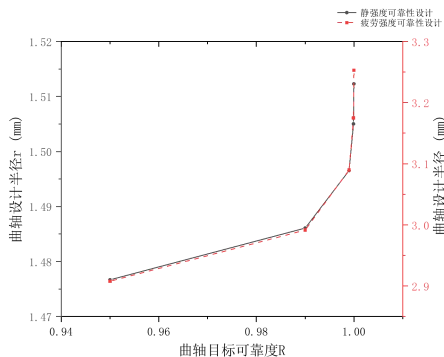


图 4 曲轴可靠性设计半径随可靠度变化

Fig.4 Crankshaft reliability design radius varies with reliability

4.1.2 材料强度离散性

材料强度离散性是描述零件在实际使用过程中材料强度随机波动的物理量。只改变曲轴所用材料的抗拉强度标准差, 曲轴静强度可靠度设计半径的变化如图 5 所示。随着材料抗拉强度标准差的增大, 曲轴静强度可靠度设计半径增大, 且增长速率也增大。

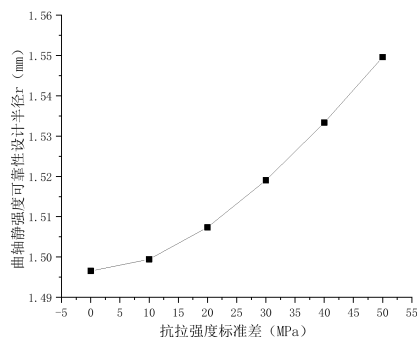


图 5 曲轴静强度可靠性设计半径随抗拉强度标准差变化
Fig.5 Variation of crankshaft static strength reliability design radius with standard deviation of tensile strength

4.1.3 应力分布随机性

应力分布随机性是描述零件实际使用过程中应力具有波动现象的物理量。只改变最大弯矩或扭矩的标准差时静强度可靠性设计半径变化如图 6 所示。随着曲轴最大弯矩或扭矩标准差的增大, 静强度可靠性设计半径尺寸增大, 且半径增长率增加。

曲轴最大扭矩的标准差对曲轴半径设计尺寸的影响更大: 当标准差都从 0MPa 增加到 100MPa 时, 改变弯矩标准差的曲轴半径从 1.49654mm 增加到 1.49700mm, 增大了 0.03%; 只改变扭矩标准差的曲轴半径从 1.49654mm 增加到 1.52062mm, 增大了 1.61%。

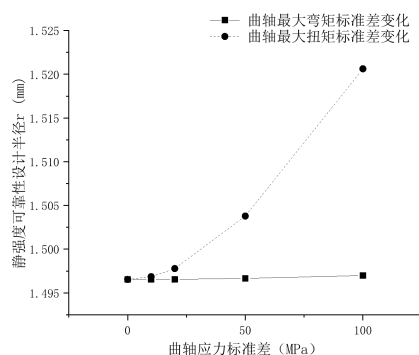


图 6 曲轴静强度可靠性设计半径随最大弯矩/扭矩标准差变化

Fig.6 Variation of crankshaft static strength reliability design radius with maximum bending moment/torque standard deviation

4.1.4 变异系数

变异系数是相应极限标准差和均值之比, 只改变曲轴弯曲或剪切应力变异系数时疲劳强度可靠性设计半径变化如图 7 所示。随着曲轴弯曲/剪切应力变异系数的增加, 疲劳强度可靠性设计

半径增加。

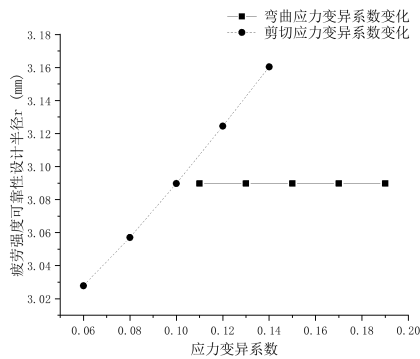


图 7 曲轴疲劳强度可靠性设计半径随弯曲/剪切应力变异系数的变化

Fig.7 Variation of reliability design radius of crankshaft fatigue strength with variation coefficient of bending/shear stress

由图 7 可知，剪切应力变异系数对曲轴设计半径影响更大：弯曲应力变异系数从 0.11 变化到 0.19，设计半径从 3.08977mm 增加到 3.08980mm，增加了 0.0008%；剪切应力变异系数从 0.06 变化到 0.14，设计半径从 3.02786mm 增加到了 3.16043mm，增加了 4.3785%。

4.2 不同因素对曲轴可靠度的影响

以曲轴静强度可靠性设计为例，考虑半径偏差系数、材料强度的离散性对曲轴可靠度 R 的影响。

4.2.1 半径偏差系数

半径偏差系数是指曲轴半径标准差与均值的比，不同半径偏差系数对其可靠度的影响如图 8 所示。随着半径偏差系数的增大，曲轴可靠度逐渐减小，减小速率逐渐增大；半径偏差系数从 0.004 到 0.016，曲轴可靠度降低了 2.68%。

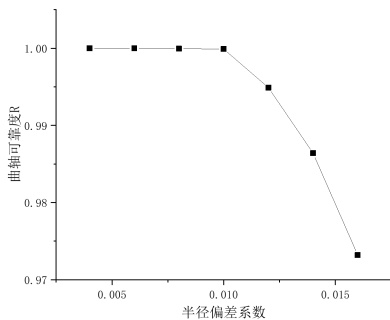


图 8 曲轴可靠度随半径偏差系数的变化

Fig.8 Variation of crankshaft reliability with radius deviation coefficient

4.2.2 材料强度的离散性

只改变曲轴材料的抗拉强度标准差，曲轴可靠度的变化如图 9 所示。当抗拉强度标准差增大时，曲轴可靠度降低，降低率逐渐增大。标准差从 0MPa 变化到 50MPa，曲轴可靠度从 0.99990 降低到 0.92650，减小了 7.34%。

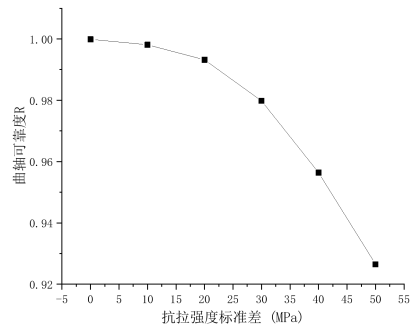


图 9 曲轴可靠度随抗拉强度标准差的变化

Fig.9 Variation of crankshaft reliability with standard deviation of tensile strength

5 结论

(1) 可靠性概率设计将应力分布、强度分布和可靠度联系起来，综合考虑材料性能的离散性、载荷应力的随机性以及强度的变化，是一种更为合理、科学的设计方法。

(2) 疲劳强度设计半径大于静强度设计半径；疲劳强度对曲轴可靠性设计具有更大的影响；当设计可靠度从 0.99999 降为 0.95000 时，疲劳强度设计半径尺寸增加的更快。

(3) 分析不同因素对曲轴可靠性设计半径的影响：曲轴的设计结构半径随着设计可靠度、材料强度标准差、应力分布标准差以及变异系数的增大而增大。疲劳强度对设计具有更大的影响；扭转力矩标准差和剪切应力变异系数对可靠性设计结构参数的影响更大。

(4) 分析不同因素对曲轴可靠度的影响：曲轴的可靠度随着半径偏差系数、材料强度标准差的增大而减小。

(5) 空调压缩机巨大的制造规模使得开展可靠性设计具有现实需要。所做研究对空调压缩机可靠性设计具有一定的参考意义。研究结果表明，在进行可靠性设计时应更关注疲劳强度、扭转力矩标准差和剪切应力变异系数。

(6) 由于行业在可靠性设计方面的研究比较

薄弱、基础数据缺乏,如材料特性、应力分布类型、变异系数等。本文在计算分析时采用相似或相近行业的数据难免会造成一定误差,后续开展针对性的基础研究是十分必要的。

参考文献:

- [1] 王枫,陈征,李花,等.采用多体动力学的压缩机曲轴结构优化[J].西安交通大学学报,2017,51(3):7-13.
- [2] 李超,丁凯,刘小菲,等.变容量涡旋压缩机曲轴系统动力特性分析[J].兰州理工大学学报,2016,42(6):52-56.
- [3] 王慧.大功率往复压缩机曲轴优化设计[J].化工设计通讯,2018,44(10):104.
- [4] 徐小婷.智能化压缩机曲轴系统技术[J].内燃机与配件,2021,(10):15-16.
- [5] 阳舟.大型压缩机曲轴的疲劳寿命分析[D].上海:华东理工大学,2014.
- [6] 江志农,王金铭,王瑶,等.气量调节工况下6M51往复压缩机曲轴有限元分析[J].机电工程,2021,38(10):1324-1331.
- [7] 陈雅琪,刘健,肖文生,等.基于ADAMS的压缩机轴系主轴承处受力分析[J].石油矿场机械,2018,47(5):9-13.
- [8] 王金武,张兆国.可靠性工程基础[M].北京:科学出版社,2013:1-3.
- [9] 戴娟,夏尊凤,汪大鹏.轴类零件的失效分析[J].机电产品开发与创新,2004,(3):85-87.
- [10] 曾声奎,王自为.可靠性设计与分析[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [16] 环球网.上海地铁成立疫情防控大客流对策部,对各车站动态管控[EB/OL].(2020-03-09) [2022-03-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1660687095838879473&wfr=spider&for=pc>.
- [17] 西部网.北京疾控中心:乘坐地铁、电梯仍需佩戴口罩,保持社交距离[EB/OL].(2020-06-10) [2022-03-22]. <http://news.cnwest.com/tianxia/a/2020/06/10/18830461.html>.
- [18] 中国青年报.石家庄地铁全面消杀检修为恢复运营做准备[EB/OL].(2021-02-01) [2022-03-22]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1690488917440355277&wfr=spider&for=pc>.
- [19] 郑丹.传染病房空气消毒技术分析[J].中国发明与专利,2020,17(S1):50-55.
- [20] Kanaan, Ghaddar, Ghali. Localized air-conditioning with upper-room UVGI to reduce airborne bacteria cross-infection[J]. Building Simulation, 2016,9(1):63-74.
- [21] 吴文娟,雷撼.方舱医院感染控制手册——新型冠状病毒肺炎疫情防控实务[M].上海:上海科学技术出版社,2020:13.