



Performance degradation model and prediction method of real-time remaining life for high temperature ceramic filter tube

Longfei LIU^{1,2}, Zhongli JI^{1,2*}, Xin LUAN^{1,2}

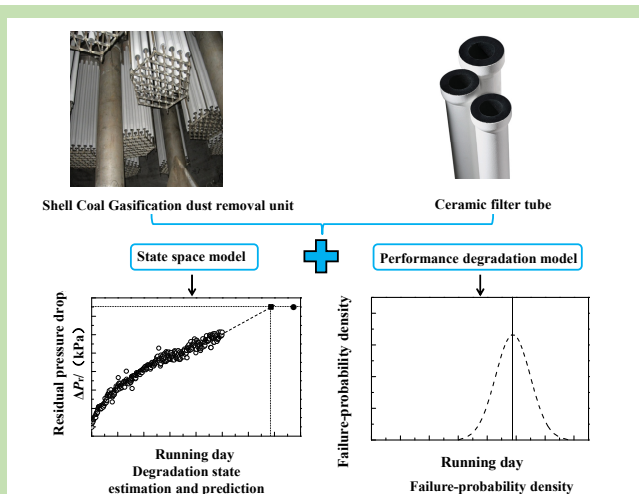
1. Department of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: High-temperature ceramic filter tube is composed of a support body with a large pore size and a membrane structure with a small pore size. In practical applications, it has a lot of dust with particle size smaller than 1 μm , which can move through the membrane structure and deposit the support body finally. It can't be removed by pulse jet cleaning effectively. Particle deposition within the support body and the compression of residual dust cake are responsible for the decreasing permeability and increasing residual pressure drop of high temperature ceramic filter tubes. In this work, on the basis of particle deposition within the filter medium and the

compression of residual dust cake can't be measured directly, Bayesian estimation theory was used to establish a state-space model to describe the ceramic filter tubes degradation process using the residual pressure drop measured in the filtration system. This method can incorporate the latest residual pressure drop data and update the model parameter timely, the remaining life of the ceramic filter tube was predicted in real time. At the same time the failure probability density distribution of the remaining life of the ceramic filter tube and the change rate of degeneration status of the ceramic filter tube were predicted. By analyzing the actual data of the ceramic filter tube residual pressure drop from high-temperature experiment device and shell coal gasification process respectively, the prediction accuracy of the remaining life increased gradually with the increase of the residual pressure drop data, the accuracy of the prediction at the later stage was higher than 95%, and the ceramic filter tubes change rate of degradation status gradually decreased. This was consistent with the conclusion that the residual pressure drop of ceramic filter tube increases fast at the early stage and slow at the late stage.

Key words: ceramic filter tube; residual pressure drop; state-space model; degradation process; remaining life prediction



收稿: 2018-04-17, 修回: 2018-06-07, 网络发表: 2018-07-10, Received: 2018-04-17, Revised: 2018-06-07, Published online: 2018-07-10

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(编号: 2016YFB0601100)

作者简介: 刘龙飞(1988-), 男, 河南省焦作市人, 博士研究生, 动力工程及工程热物理专业, E-mail: liulongfei0605@126.com; 姬忠礼, 通讯联系人, E-mail: jizhongli63@vip.sina.com.

引用格式: 刘龙飞, 姬忠礼, 栾鑫. 高温陶瓷过滤管性能退化建模及实时寿命预测. 过程工程学报, 2019, 19(1): 165-172.

Liu L F, Ji Z L, Luan X. Performance degradation model and prediction method of real-time remaining life for high temperature ceramic filter tube (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(1): 165-172, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218183.

高温陶瓷过滤管性能退化建模及实时寿命预测

刘龙飞^{1,2}, 姬忠礼^{1,2*}, 栾鑫^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249

摘要: 高温陶瓷过滤管由内部孔径较大的支撑体和外部孔径较小的过滤膜双层结构构成, 在实际应用中, 存在大量粒径较小的粉尘颗粒, 会穿过过滤膜沉积到支撑体内部, 脉冲反吹无法有效清除。因支撑体内颗粒沉积及管壁外残余粉尘层不断压缩, 使陶瓷过滤管渗透率不断下降, 残余压降逐渐增加。本工作基于高温陶瓷过滤管壁内颗粒沉积特性及残余粉尘层压缩不可直接观测的特点, 结合贝叶斯估计理论, 利用过滤管运行期间采集的残余压降数据, 提出一种基于状态空间模型的过滤管性能退化建模方法。该方法能融入最新采集到的残余压降数据, 实时对模型参数进行更新, 可对陶瓷过滤管的剩余寿命进行实时预测, 同时对陶瓷过滤管剩余寿命的失效概率密度分布及陶瓷过滤管的退化状态变化率进行预测。对某高温试验装置及壳牌煤气化装置中的陶瓷过滤管残余压降分析表明, 预测剩余寿命准确率随残余压降数据增加而逐渐增加, 后期预测准确率高于 95%, 且陶瓷过滤管退化状态变化率逐渐变小, 与陶瓷过滤管残余压降前期增加快后期增加慢的现象一致。

关键词: 陶瓷过滤管; 残余压降; 状态空间模型; 性能退化; 寿命预测

中图分类号: TQ028

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)01-0165-08

1 前言

高温陶瓷过滤管被认为是最具发展潜力的高温气体净化设备, 具有耐高温、耐酸碱及阻力适当等特点, 已广泛应用于整体煤气化联合循环发电(Integrated gasification combined cycle)、增压流化床燃烧联合循环(Pressurized fluidized bed combustion)发电、生物质气化和催化裂化等领域^[1-4]。陶瓷过滤管在使用过程中阻力不断增加, 残余压降逐渐增大, 达到一定阈值后寿命结束。

高温陶瓷过滤管一般为双层结构, 由孔径较大的支撑体和孔径较小的过滤膜组成, 过滤膜的平均孔径为 10 μm ^[5]。实际应用中, 存在大量小于 1 μm 的粉尘颗粒, 在过滤过程中不可避免地沉积在过滤管壁内, 脉冲反吹也无法清除^[6]。Chung 等^[7]分别在不同温度下, 使用基体平均孔径 10 μm 的陶瓷滤管过滤几何平均粒径为 3.44 μm 的粉尘 50 h, 对陶瓷过滤管用扫描电镜观察, 发现小于 5 μm 的粉尘颗粒会穿过陶瓷过滤膜沉积到过滤管壁内。Alvin^[8]发现, 陶瓷过滤管在使用过程中出现龟裂和断裂, 与颗粒沉积在过滤管基体内部有关。迟化昌等^[9]使用树脂包埋和扫描电镜对陶瓷过滤管基体内颗粒沉积和孔隙率变化进行了详细分析, 发现距过滤面较近处粉尘沉积严重, 且随循环次数增加, 粉尘向滤管内径方向沉积。Durst 等^[10]发现陶瓷过滤管在使用过程中渗透率 K 随循环次数 N 增加而下降, 与初始渗透率 K_0 的关系为 $K=K_0N^{-r}$, r 为经验参数。Phillips 等^[11]对温度 220~270 $^{\circ}\text{C}$ 下经 2000 个循环后的陶瓷过滤管的渗透率

进行了计算, 渗透率下降到最初的 1/10, 与 Durst 等^[10]提出的渗透率计算公式相符。姬忠礼等^[12,13]在高温装置上考察了陶瓷过滤管的残余压降, 发现在过滤初期残余压降上升较快, 之后上升趋势变缓。在实际生产过程中, 通常用无量纲准数阻力系数预测陶瓷过滤管寿命, 初始过滤管的阻力系数为 0.4, 阻力系数会随脉冲反吹循环次数增加而逐渐增大, 当过滤管的阻力系数达到 0.9 后使用寿命结束^[14]。研究结果表明过滤管壁内颗粒沉积是导致过滤管渗透率下降及阻力不断增大的原因, 也是过滤管循环不可逆的原因。

陶瓷过滤管残余压降增加, 从某种意义上是陶瓷过滤管性能退化的表现。国内外学者对残余压降增加的原因作了大量研究, 但均借助于微观机理分析。实际生产中, 陶瓷过滤管的退化过程不可直接测量, 对陶瓷过滤管寿命预测研究较少。本工作借助状态空间模型描述陶瓷过滤管在使用过程中的退化过程, 利用贝叶斯状态估计与预测理论对状态空间模型进行求解, 并由退化状态的预测分布得到陶瓷过滤管的失效时间分布, 实现对陶瓷过滤管的实时寿命预测, 对实际生产有重要的指导意义。

2 模型建立

随脉冲反吹循环次数增加, 过滤管壁内粉尘颗粒沉积导致其性能退化, 残余压降不断上升。残余压降为脉冲反吹结束时过滤器上下游的压差, 主要由两部分构成:

$$\Delta p_t = \Delta p_f + \Delta p_{re} \quad (1)$$

其中, Δp_t 为过滤器的残余压降, Δp_f 为过滤管基体压降,

Δp_{re} 为残余粉尘层压降。

过滤管基体内部沉积的粉尘及不断压缩的残余粉尘层无法直接测量, 残余压降不断上升, 可通过差压变送器测定。实际生产中一般当残余压降达到一定阈值时会更换过滤管。残余压降测定时, 环境因素及传感器噪声均会影响测量结果, 最终得到的残余压降含一定噪声。

2.1 状态空间模型及贝叶斯状态估计与预测

实际生产过程中, 设备运行通常会有两种状态变量, 一种是无法直接检测的状态变量, 称为状态向量, 能真实反映系统的实际情况; 另一种是可直接被传感器等仪器测量, 称为观测量。状态空间模型建立了观测量和系统内部状态之间的关系, 如图 1 所示, 图中 $X_0, X_1, \dots, X_n, X_{n+1}$ 分别为系统的状态量, Y_0, Y_1, \dots, Y_n 分别为系统的观测量。

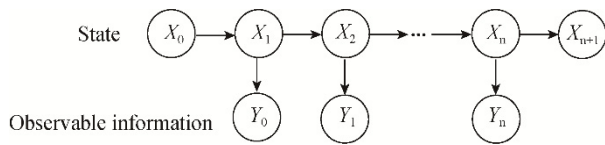


图 1 系统状态与观测量的关系

Fig.1 Relationship between observation and system state

陶瓷过滤管性能退化的状态空间模型可用式(2)^[15]描述:

$$y_n = f_\theta(x_n, v_n), x_n = g_\theta(x_{n-1}, w_n) \quad (2)$$

其中, n 为脉冲反吹循环次数或运行时间, f_θ 为观测方程, 描述高温陶瓷过滤管残余压降与其退化状态之间的函数关系, g_θ 为状态方程, 描述高温陶瓷过滤管退化状态随脉冲反吹循环次数(运行时间)的变化, y_n 为第 n 次脉冲反吹循环(运行第 n 天)的观测量, 即残余压降, x_n 为第 n 次脉冲反吹循环(运行第 n 天后)的状态变量, 即陶瓷过滤管的实际退化状态, v_n 和 w_n 分别为观测噪声和过程噪声, θ 为模型参数向量。

给定陶瓷过滤管性能退化的状态空间模型及残余压降序列 $y_{1:n}$, 贝叶斯状态估计可构造出未知状态的后验分布 $\pi(x_n, y_{1:n})$, 推导出陶瓷过滤管的最优状态^[16,17]。已知第 n 次脉冲反吹循环(运行第 n 天)后陶瓷过滤管状态后验分布 $\pi(x_n, y_{1:n})$, 可由式(3)得到在未来任意 $n+k$ 次脉冲反吹循环(运行 $n+k$ 天后)陶瓷过滤管的状态分布:

$$\pi(x_{n+k} | y_{1:n}) = \int \pi(x_{n+k} | x_{n+k-1}) \pi(x_{n+k-1} | y_{1:n}) dx_{n+k-1} \quad (k \geq 1) \quad (3)$$

2.2 过滤管失效分布

累积失效概率是在规定条件和规定时间内失效的

概率。假设过滤管设定的残余压降阈值为 x_R , 当实际残余压降 x_r 达到该阈值时, 过滤管使用寿命终结, 对应的最终脉冲反吹循环次数为 N (运行天数 n), $F(n)$ 为过滤管在第 n 次脉冲反吹循环(运行第 n 天)后的累积失效概率, 累计失效过程可由下式^[18]得到:

$$F(n) = P[x_r \geq x_R] = \int_{x_R}^{\infty} \pi(x_n) dx \quad (4)$$

任意时刻累积失效概率 $F(n)$ 等于此时退化状态大于失效阈值的累积概率 $P[x_r \geq x_R]$ 。

第 n 次脉冲反吹循环(运行天数 n)的失效概率密度为

$$f(n) = \frac{\partial [F(n)]}{\partial n} \quad (5)$$

2.3 性能退化模型

陶瓷过滤管刚使用时, 残余压降增长较快, 待残余粉尘层形成且稳定后, 残余压降开始缓慢增长。采用动态线性增长模型作为状态方程描述系统的退化轨迹^[19]:

$$x_n = x_{n-1} + \mu_{n-1} + w_{x,n}, w_{x,n} \sim N(0, W_x) \quad (6)$$

$$\mu_n = \mu_{n-1} + w_{\mu,n}, w_{\mu,n} \sim N(0, W_\mu) \quad (7)$$

式中, μ_n 为陶瓷过滤管退化状态的变化率, $w_{x,n}$ 和 $w_{\mu,n}$ 为服从高斯分布的过程噪声, 方差 W_x 和 W_μ 待估计。得到基于陶瓷过滤管残余压降序列的用于描述过滤管性能退化的高斯线性状态空间模型如下:

$$Y_n = F_n X_n + v_n, v_n \sim N(0, V)$$

$$X_n = G_n X_{n-1} + w_n, w_n \sim N(0, W) \quad (8)$$

式中, $X_n = \begin{bmatrix} x_n \\ \mu_n \end{bmatrix}$, $Y_n = \Delta p_r$, $W = \begin{bmatrix} W_x & 0 \\ 0 & W_\mu \end{bmatrix}$, $G_n = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,

$F_n = [1 \ 0]$ 。

使用 R 语言^[20]对给定的陶瓷过滤管的残余压降序列建立状态空间模型[式(8)], 用式(3)求解, 得到陶瓷过滤管的性能退化状态。

3 结果与讨论

3.1 实验用陶瓷过滤管

实验流程如图 2 所示, 实验中采用负压抽风方式实现气体流动, 冷空气在预热段与过滤器出口的高温气体换热, 预热后的气体进入加热段达到预定温度, 与通过螺旋加料器加入的粉煤灰混合均匀后进入过滤器内部。过滤后粉尘被截留在陶瓷过滤管表面, 洁净气体由过滤器上部的集气室出来, 在预热段与入口冷空气换热后进

入水冷却器冷却, 冷却后的气体通过风机排出。

过滤一定时间或过滤器达到设定压降后, 采用脉冲反吹方式对过滤管清灰。脉冲反吹时, 由脉冲控制仪控

制的电磁阀打开, 高压氮气经电磁阀、连接管及喷嘴后, 经引射器引射气体后进入过滤管内部, 利用瞬态能量实现粉尘层的剥离。

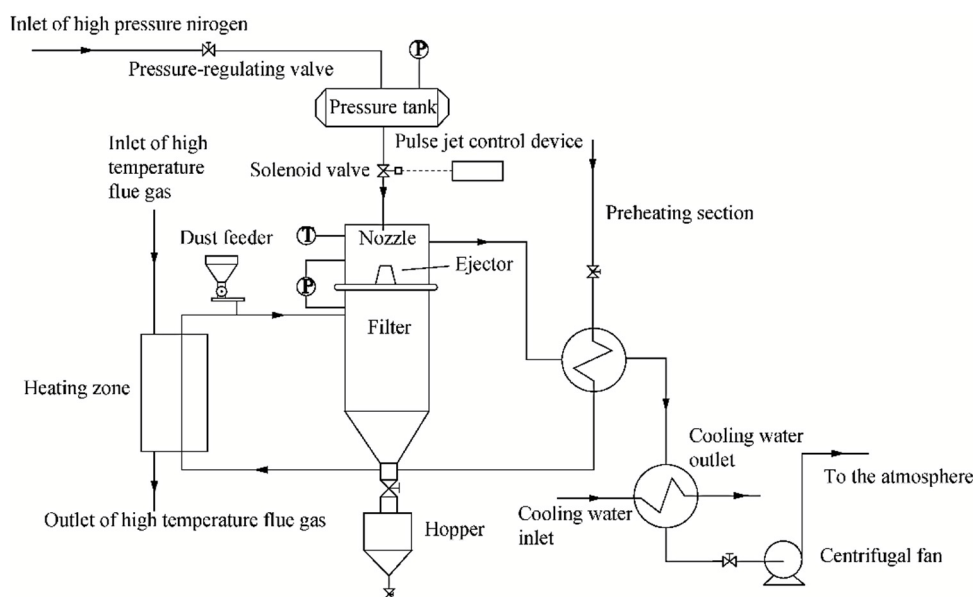


图2 实验流程图

Fig.2 Schematic diagram of experiment

分别在圆筒体和集气室各引出一个测压管, 连接 U 型管两端, 用 U 型管差压计测量压降。先用 U 型管压差计测得水柱差, 利用公式 $\Delta p = \rho gh$ 计算压降, 其中 ρ 为水密度 (kg/m^3), h 为水柱高度差 (m), g 为重力加速度 (m/s^2)。实验装置中有 3 根陶瓷过滤管, 长 1.0 m, 内径 40 mm, 外径 70 mm, 孔隙率为 38%, 密度为 1.85 g/m^3 , 过滤气体精度小于 0.5 μm 。实验用粉煤灰取自国内某电厂, 其体积中位粒径为 6.5 μm , 粉尘堆积密度为 580 kg/m^3 。在温度 473 K、过滤气速 0.03 m/s、反吹压力 0.5 MPa、脉冲宽度 300 ms 的条件下, 采用定时反吹方式脉冲反吹循环 600 次, 每次循环时间约 20 h。

图 3 为整个实验期间测定的过滤管的残余压降。由图可看出, 在陶瓷过滤管运行初期, 残余压降增长较快, 当达到一定值后, 残余压降增长较慢。这是因为过滤初期残余粉尘层尚未形成, 残余压降增长较快, 当残余粉尘层稳定后, 残余压降缓慢增长。以循环次数为自变量, 通过幂函数拟合出残余压降的变化曲线, 残余压降与循环次数变化的函数关系如下:

$$\Delta p_r = 4.86n^{0.0304} \quad (9)$$

陶瓷过滤管脉冲反吹循环次数定为 600 次, 分别对脉冲反吹循环前 200 次、前 390 次及前 580 次的残余压降数据建模并预测。设定的陶瓷过滤管残余压降阈值为

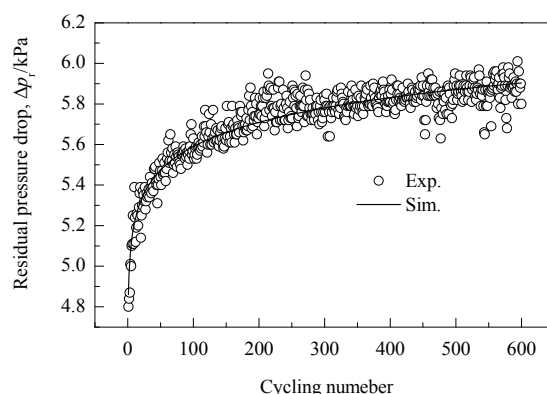


图3 过滤管残余压降

Fig.3 Residual pressure drop of ceramic filter tube

6.05 kPa, 即当过滤管的残余压降超过 6.05 kPa 时, 使用寿命结束。用式(9)计算当陶瓷过滤管残余压降为 6.05 kPa 时, 所需脉冲反吹循环次数为 1352 次。

3.1.1 退化状态估计与预测

将循环前 200 次的残余压降输入 R 语言编制的程序中, 经运算可估计出当前系统的退化状态, 得到的模型参数如下: $\pi(x_{200}, y_{1:200}) = N(5.7, 0.37^2)$, $\pi(\mu_{200}, y_{1:200}) = N(0.011, 0.087^2)$, $W_x = 0.38^2$ 。图 4 为基于循环前 200 次陶瓷过滤管残余压降得到的退化状态估计与预测结果, 模型计算的残余压降为 6.05 kPa 时所需的脉

冲反吹循环次数为 468 次, 与拟合公式计算的 1352 次差别较大。此时过滤管退化状态变化率 $\mu_{200}=0.011$ 。

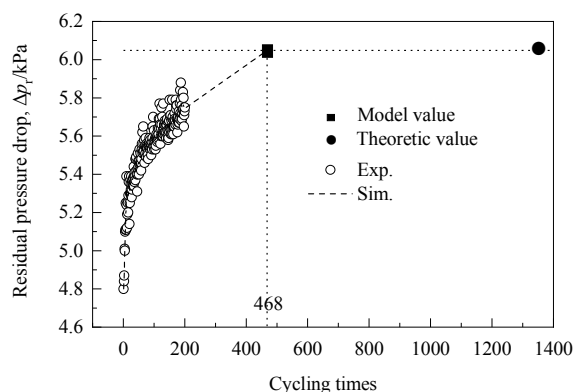


图 4 循环 200 次陶瓷过滤管残余压降估计与预测值
Fig.4 Residual pressure drop of degradation state estimation and prediction of ceramic filter tube after cycling 200 times

随着脉冲反吹循环进行, 将新的残余压降数据不断融入模型中, 可得到新的退化状态。图 5 和 6 分别为根据陶瓷过滤管脉冲反吹循环前 390 次与前 580 次的残余压降预测的过滤管退化状态。

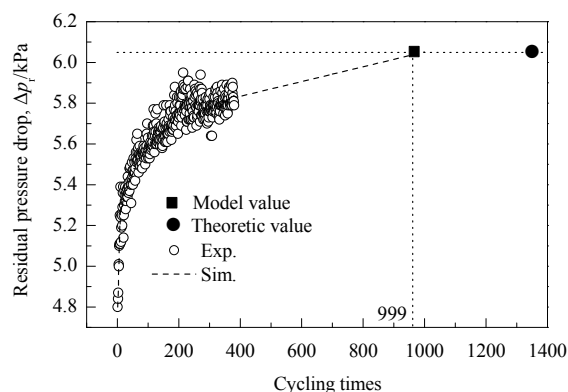


图 5 循环 390 次的陶瓷过滤管残余压降估计与预测值
Fig.5 Residual pressure drop of degradation state estimation and prediction of ceramic filter tube after cycling 390 times

利用状态空间模型对陶瓷过滤管前 390 次循环的残余压降数据进行建模计算, 得到当残余压降为 6.05 kPa 时所需脉冲反吹循环次数为 999 次, 此时 $\mu_{390}=0.003$ 。根据前 580 次循环的残余压降, 计算得当残余压降为 6.05 kPa 时所需脉冲循环次数为 1323 次, 与式(9)计算的 1352 次差别较小, 此时 $\mu_{580}=0.002$ 。对比图 4~6 可发现, 使用状态空间模型对陶瓷过滤管寿命进行预测时, 随循环次数增加, 退化趋势预测更准确, 预测不确定性逐渐降低。随循环次数增加, 陶瓷过滤管退化状态变化率 μ 逐渐减小, 与陶瓷过滤管的残余压降变化趋势一致。

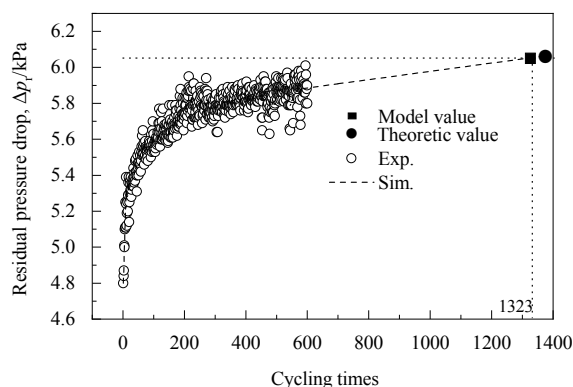


图 6 循环 580 次陶瓷过滤管残余压降估计与预测值
Fig.6 Residual pressure drop of degradation state estimation and prediction of ceramic filter tube after cycling 580 times

3.1.2 失效时间预测

结合式(4)和(5)可得任意时刻陶瓷过滤管的失效概率密度分布。图 7 分别为陶瓷过滤管脉冲反吹循环前 200 次、前 390 次及前 580 次失效概率密度分布, 其中垂直垂线是根据式(9)在陶瓷过滤管残余压降阈值为 6.05 kPa 时计算的理论失效循环次数 1352 次。由图可看出, 随循环次数增加, 陶瓷过滤管失效时间预测值越接近理论值, 预测的不确定性逐渐减小, 这是由于贝叶斯公式(3)能不断融入新的数据, 从而及时更新模型参数。

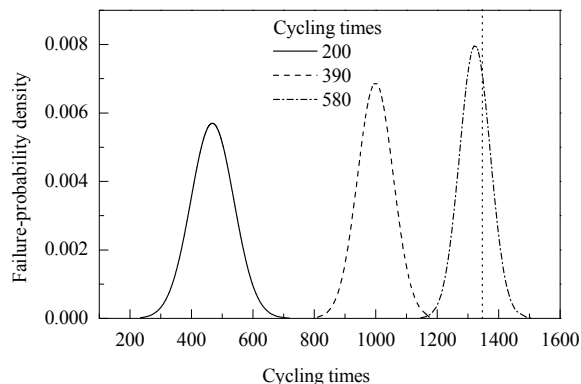


图 7 陶瓷过滤管失效概率密度
Fig.7 Failure-probability density of ceramic filter tube

3.2 现场用陶瓷过滤管

图 8 为国内某壳牌煤气化装置中 S1501 除尘单元示意图, 过滤器内部安装有 576 根长 1.5 m、内径 40 mm、外径 60 mm 的陶瓷过滤管。管板将过滤器密封分隔为上下两部分, 上部分为洁净气体侧, 下部分为含尘气体侧。从气化单元过来的含尘气体由进气管路进入过滤器内部, 经提升管及其顶端的气体分布器分散后到达各组过滤管表面, 在气体压差的作用下, 粉尘颗粒物被截留在过滤管外壁面, 形成滤饼层, 过滤后的气体由洁净气

体侧进入下一个单元。随过滤操作进行,过滤管压降不断增大,需采用脉冲反吹方式对各组过滤管进行清灰,反吹清灰时,由可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)控制的电磁阀迅速开启,喷嘴喷出的高速高压气体经引射器二次引流后进入过滤管内部,利用瞬态的能量将过滤管外壁面的粉尘层剥离,实现过滤管再生,粉尘落入下面的灰斗中,定期移除。分别在含尘气体侧与洁净气体侧引出测压管,连接到差压变送器,测定整个过程中的循环压降和脉冲反吹结束后过滤管的残余压降。

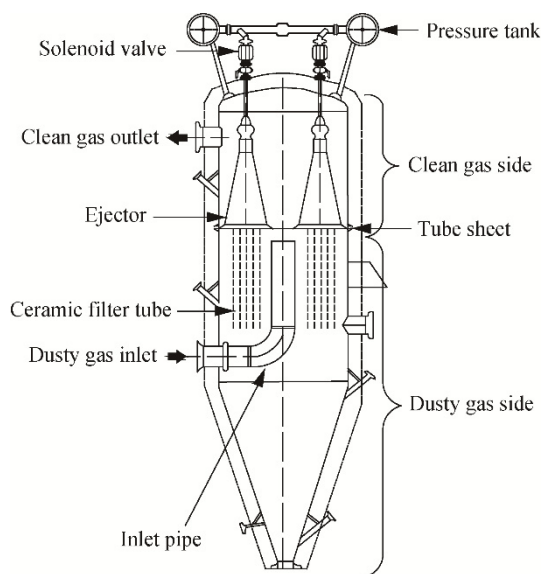


图8 壳牌煤气化除尘单元示意图

Fig.8 Schematic diagram of Shell coal gasification dust removal unit

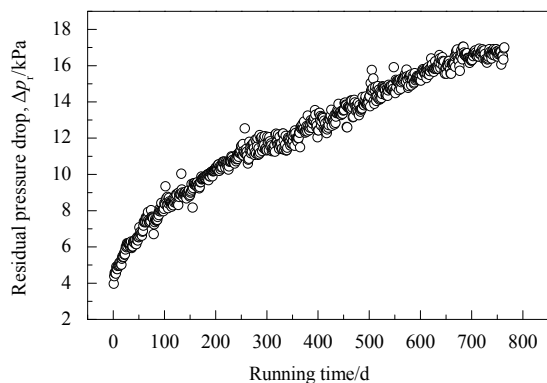


图9 陶瓷过滤管残余压降

Fig.9 Residual pressure drop of ceramic filter tube

气化单元产生的粉煤灰密度为 2200 kg/m^3 , 其体积中位粒径为 $6.2 \mu\text{m}$, 堆积密度为 550 kg/m^3 , 静安息角为 $40^\circ \sim 70^\circ$ 。过滤器中使用的过滤管孔隙率为 38%, 渗透率为 $55 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ 。在温度 340°C 、操作压力 3.96 MPa 、

脉冲反吹压力 8.02 MPa 、过滤气速为 0.015 m/s 的工况下, 从 2010 年 8 月到 2012 年 11 月, 累计运行 764 d 后更换过滤管, 整个过程过滤管的残余压降如图 9 所示。设定过滤管的失效阈值为 17 kPa , 过滤管运行到第 764 d 时, 残余压降已超过 17 kPa , 过滤管失效。

3.2.1 现场用陶瓷过滤管退化状态估计与预测

取运行 250, 500 及 720 d 的残余压降数据进行预测, 设定的陶瓷过滤管残余压降阈值为 17 kPa 。图 10 为基于运行前 250 d 陶瓷过滤管残余压降值得到的退化状态估计与预测结果, 通过贝叶斯模型预测过滤管运行天数为 463 d 达到 17 kPa 的阈值, 与过滤管实际运行时间 764 d 的差别较大, 此时过滤管退化状态变化率 $\mu_{250}=0.027$ 。

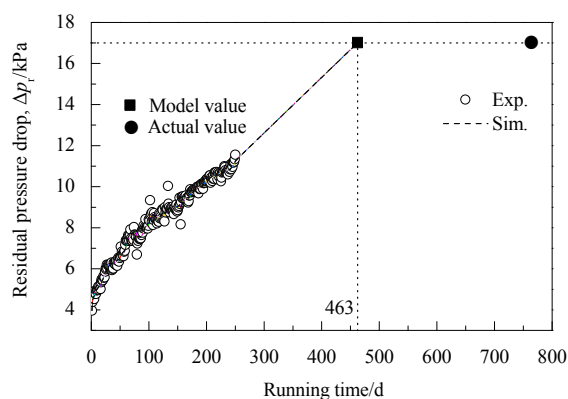


图10 运行 250 d 陶瓷过滤管退化状态估计与预测值

Fig.10 Degradation state estimation and prediction of ceramic filter tube after running 250 d

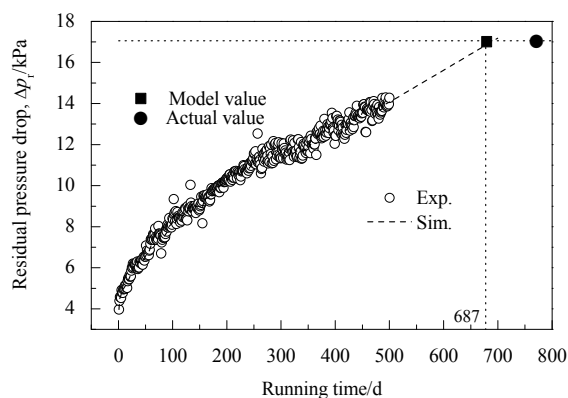


图11 运行 500 d 陶瓷过滤管退化状态估计与预测值

Fig.11 Degradation state estimation and prediction of ceramic filter tube after running 500 d

随运行时间不断增加, 将新的残余压降数据不断输入模型中, 可得到新退化状态。图 11 和 12 分别为根据陶瓷过滤管运行 500 与 720 d 时的残余压降预测的过滤管退化状态估计结果。

使用状态空间模型对陶瓷过滤管运行前 500 d 的残

余压降数据进行建模计算, 得到残余压降为 17 kPa 时所需时间为 687 d, 此时 $\mu_{500}=0.015$ 。根据前 720 天的残余压降计算, 得到残余压降为 17 kPa 时所需时间为 752 d, 此时 $\mu_{720}=0.008$, 与真实运行时间很接近。

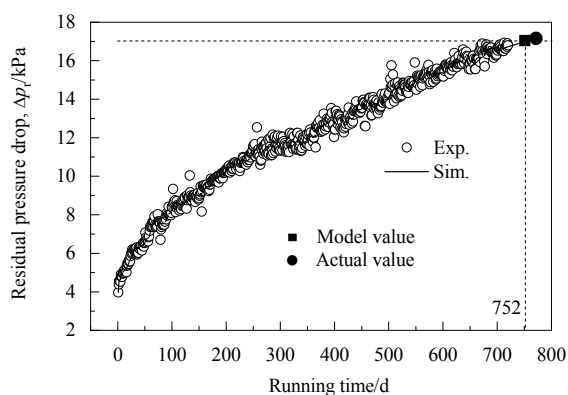


图 12 运行 720 d 陶瓷过滤管退化状态估计与预测值

Fig.12 Degradation state estimation and prediction of ceramic filter tube after running 720 d

对比图 10~12 可发现, 使用状态空间模型对陶瓷过滤管寿命进行预测时, 随运行时间增加, 预测值逐渐接近真实值, 陶瓷过滤管退化状态的变化率 μ 逐渐减小。

3.2.2 现场用陶瓷过滤管失效时间预测

图 13 为陶瓷过滤管运行 250, 500 及 720 d 时的失效概率密度分布, 其中竖直垂线为当陶瓷过滤管残余压降阈值为 17 kPa 时, 实际运行时间 764 d。由图可看出, 随循环次数增加, 陶瓷过滤管失效时间预测值越接近理论值, 预测不确定性逐渐减小。

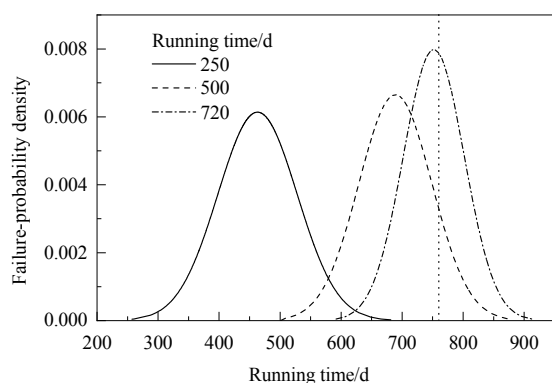


图 13 陶瓷过滤管失效概率密度

Fig.13 Failure-probability density of ceramic filter tube

4 结 论

以实际运行的陶瓷过滤管残余压降数据为基础, 将状态空间模型与贝叶斯估计理论相结合, 分别对实验用陶瓷过滤管和壳牌煤气化用陶瓷过滤管的性能退化及

寿命进行实时预测, 得到如下结论:

(1) 所建模型可对陶瓷过滤管的退化状态及剩余寿命进行预测, 且可根据最新的残余压降对退化状态及剩余寿命进行实时预测, 随循环次数增加, 预测结果越来越接近真实值。

(2) 随脉冲反吹循环次数增加, 状态空间模型计算的陶瓷过滤管退化状态变化率逐渐减小, 与陶瓷过滤管残余压降前期增加较快、后期增加缓慢的现象一致。

(3) 状态空间模型可对不同循环次数的陶瓷过滤管失效概率密度进行预测, 随循环次数增加, 预测结果逐渐接近真实值。

参考文献

- [1] Holt N A H. Operating experience and improvement opportunities for coal-based IGCC plants [J]. *Materials at High Temperatures*, 2003, 20(1): 1-6.
- [2] Heidenreich S. Hot gas filtration—a review [J]. *Fuel*, 2013, 104(2): 83-94.
- [3] 吴小林, 肖旺, 姬忠礼. 陶瓷滤管运行过程中的振动特性测定与分析 [J]. *过程工程学报*, 2010, 10(5): 874-878.
Wu X L, Xiao W, Ji Z L. Measurement and analysis of vibration behavior of ceramic filter element in operating conditions [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2010, 10(5): 874-878.
- [4] 杨亮, 姬忠礼, 赖通. 行列式刚性陶瓷过滤器脉冲反吹系统中的压力特性 [J]. *过程工程学报*, 2014, 14(2): 181-188.
Yang L, Ji Z L, Lai T. Pressure characteristics in pulse cleaning system of rigid ceramic filter [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2014, 14(2): 181-188.
- [5] Freitas N L D, Goncalves J A S, Innocentini M D M, et al. Development of a double-layered ceramic filter for aerosol filtration at high-temperatures: the filter collection efficiency [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136(3): 747-756.
- [6] Schildermans I, Baeyens J, Smolders K. Pulse jet cleaning of rigid filters: a literature review and introduction to process modeling [J]. *Filtration & Separation*, 2004, 41(5): 26-33.
- [7] Chung J D, Hwang T W, Park S J. Filtration and dust cake experiment by ceramic candle filter in high temperature conditions [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2003, 20(6): 1118-1122.
- [8] Alvin M A. Impact of char and ash fines on porous ceramic filter life [J]. *Fuel Processing Technology*, 1998, 56: 143-168.
- [9] 迟化昌, 姬忠礼, 孙冬梅. 陶瓷滤管基体粉尘沉积状况 SEM 分析 [J]. *石油化工高等学校学报*, 2010, 23(3): 72-78.
Chi H C, Ji Z L, Sun D M. SEM analysis of ash deposition in ceramic filter support body [J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2010, 23(3): 72-78.
- [10] Durst M, Reinhardt A, Vollmer H. High efficiency particle collection with the aid of ceramic filter media [C]//*Proceedings of the 1st European Symposium on Separation of Particles from Gases*. 1989: 73-81.
- [11] Phillips J N, Dries H W A. Filtration of flyslag from the shell coal gasification process using porous ceramic candles [C]//*Gas Cleaning at High Temperatures*. Berlin: Springer Netherlands. 1993: 127-141.
- [12] 姬忠礼, 刘加明, 史方军, 等. 高温陶瓷过滤器循环过程的热态实验研究 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(6): 92-97.
Ji Z L, Liu J M, Shi F J, et al. Thermal state experiment on cycle

- performance of high-temperature ceramic filter [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2006, 30(6): 92–97.
- [13] 焦海青, 姬忠礼, 陈鸿海, 等. 操作参数对陶瓷过滤管脉冲反吹清灰过程的影响 [J]. 化工学报, 2004, 55(7): 1155–1160.
- Jiao H Q, Ji Z L, Chen H H, et al. Influence of operating parameters on pulse cleaning process of ceramic filter [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004, 55(7): 1155–1160.
- [14] Scheibner B, Wolters C. Schumacher hot gas filter long-term operating experience in the NUON power buggenum IGCC power plant [C]//Proceedings of the 5th International Symposium on Gas Cleaning at High Temperature. 2002: 104–114.
- [15] Harvey A, Koopman S J, Shephard N. State space and unobserved component models: theory and applications [M]. London: Cambridge University Press, 2004: 71–73.
- [16] West M, Harrison J. Bayesian forecasting and dynamic models [M]. New York: Springer-Verlag, 1997: 36–45.
- [17] 孙见忠, 左洪福. 系统实时性能可靠性评估的贝叶斯方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8): 1790–1796.
- Sun J Z, Zuo H F. Bayesian method for system real-time performance reliability assessment [J]. System Engineering and Electronics, 2013, 35(8): 1790–1796.
- [18] Zuo M J, Jiang R, Yam R C. Approach for reliability modeling of continuous—state devices [J]. IEEE Trans on Reliability, 1999, 48(1): 9–18.
- [19] Petris G, Petrone S, Campagnoli P. Dynamic linear models with R [M]. New York: Springer-Verlag, 2009: 54–58.
- [20] Core T R. A language and environment for statistical computing [J]. Computing, 2015, 1: 12–21.