

Research on Piston Ring Lines under Free State

Zheng Li, Guitang Wang, Yongbin Chen, Tai Fu, Xiangbo Li

Information Engineering College, Guangdong University of Technology, Guangzhou
Email: 1114695123@qq.com

Received: Jul. 10th, 2014; revised: Aug. 6th, 2014; accepted: Aug. 15th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

For engine piston ring, the outer round degree and end gap size are the important parameters, so most of the manufacturing enterprises do full inspection to them. Current test methods are testing in ring gauge imitating piston ring in the cylinder liner working state. In order to improve the efficiency of the piston ring detection, people pay more attention to do test when engine piston ring is under free condition. According to the radial stress curve received by piston ring in the working state, with the condition of the invariant neutral axis before and after bend, the radial displacement and angle displacement of each point when engine piston ring returns to free condition from compression condition are deduced, and thus the piston ring lines of free condition under such pressure curve are obtained. Finally, we select a certain type of piston ring of a factory; according to the radial pressure distribution in working, parameters are set and simulated for the derived formulas in this paper; and the error analysis is made between the simulation results and the original image. The result shows that the simulation results and the original error are within the accuracy, so this method can be used to detect piston ring clearance and roundness.

Keywords

Piston Ring, Radial Stress, Curve Model

自由状态下活塞环型线探讨

李 峥, 王桂棠, 陈永彬, 付 泰, 李湘波

广东工业大学信息工程学院, 广州

Email: 1114695123@qq.com

收稿日期：2014年7月10日；修回日期：2014年8月6日；录用日期：2014年8月15日

摘要

发动机活塞环的外圆圆度和闭口间隙是其重要的参数，大多数的生产企业都对其全检。目前检验方法都是模仿活塞环在缸套工作状态在环规内检验。为了提高活塞环检测的效率，在活塞环自由状态下进行检测受到人们重视而进行。本文根据工作状态时的活塞环所受到的径向压力曲线，以中性轴在弯曲前后保持不变作为条件，推导出活塞环从压缩状态恢复到自由状态时各点产生的径向位移和角位移，从而得出该种压力曲线下该环自由状态下的活塞环型线。最后，选取某工厂的某种类型的活塞环，根据工作时所对应的径向压力分布，对文中推导的公式进行参数设定，并进行了仿真，最后将仿真结果和原图进行了误差分析，结果显示，仿真结果和原图误差在准确度以内，即可以选用此方法来检测活塞环的闭口间隙和圆度。

关键词

活塞环，径向压力，曲线模型

1. 引言

活塞环是发动机中的重要零件之一，它的密封性能好坏直接影响发动机的工作效率、排放质量和可靠性[1]。活塞环的主要检验参数是外圆圆度和闭口间隙尺寸。传统的检测方法是模仿活塞环在缸套工作状态在环规内检验，通过塞规和漏光人工检验，检测效率很低，准确性也不高[2]。近年来，有不少学者研究活塞环的自动监测[3]。其中自由状态下活塞环的自动检测[4]更有吸引。具体做法是，用照相机采集到自由状态下活塞环的图像，通过一系列数字图像算法的处理，从而检测出外圆圆度和闭口间隙尺寸。这种算法虽然在一定程度上提高了检测的效率和准确度，但因为噪声、灰尘等外界不可抗拒因素的影响，准确度仍是难以保证。

活塞环在自由状态时为非圆的特殊型线，而装入气缸后，就会对缸壁产生一定的径向压力，环的径向压力分布与其自由状态型线是密切相关的[5]。H. Anold 提出以直角坐标系为参考系的活塞环型线计算方法[6]，该方法分别以 x 、 y 坐标计算出活塞环的理论形状，是近些年的活塞环型线计算方法的基础。其理论虽然提高了精确性，但其计算公式参数非常繁琐。鉴于此，本文通过分析活塞环工作状态时所受的径向压力曲线分布情况，找到活塞环自由状态下的曲线和工作状态下曲线的转换关系，进而得到活塞环自由状态下的曲线模型。这样就可以通过查看自由状态下活塞环图像是否符合既定模型来判断该活塞环是否符合要求。

2. 活塞环径向压力分布类型

由于活塞环的径向厚度比其半径小得多，故在计算活塞环的自由形状与径向压力分布的关系时可采用弯曲梁应力计算的方法来求取[7]。环的径向压力分布大致分为两种类型：压力均匀分布，如均压环；不均匀分布，如高点环和低点环。

2.1. 活塞环压力均匀分布

压力均匀分布的均压环磨损后，环面的均压分布受到破坏，特别是开口处的径向压力下降很快，削弱了环的密封和刮油作用；除此之外，由于开口处磨损后不再与缸壁接触，环端在环槽中振动的自由度

增加,当发动机提高转速时容易引起环在环槽内抖振,加剧活塞环上下端面和环槽的磨损,因此,在中、高速四冲程发动机上,均压环已不再适用[8]。

2.2. 活塞环压力不均匀分布

2.2.1. 高点环

将环开口处压力提高在成为开口处有较高压力的不均匀压环,称为高点环[9]。高点环的径向压力分布形状,按不同的理论计算可分为桃形压力分布和梨形压力分布。桃形压力分布的环,开口处有较大压力,开口对面环脊处的压力亦增高,在90度附近径向压力小于平均径向压力;梨形压力分布的环,开口处有很大压力,开口对面环脊处的压力增高不多,在120度附近压力分布有剧烈变化,该处压力小于平均压力。

两种压力分布形状各有其理论依据和实用价值,如日本汽车工业标准推荐的是桃形分布的高点环,其高点值一般不超过平均压力的2倍。前苏联曾规定,高点环的高点值为平均压力的2.85倍,即采用梨形分布。我国基本沿袭前苏联的规定,推荐采用梨形分布的高点环。

2.2.2. 低点环

低点环是相对于高点环而言,即环开口处的压力低于平均压力,其压力分布形状有两种,在均压分布的基础上使开口处的压力有所减小,形成开口处内凹的压力分布称为苹果形分布;在开口处附近若干角度内,使环端的压力为零,形成开口处有压力缺口的压力分布,称为K形分布。在横流扫气的二冲程发动机上,活塞环通过气口时,环开口端容易刮碰气口而造成断环,为此,降低开口端压力,使成为低点环。

3. 活塞环径向压力分布表达式的推导

3.1. 弯梁的建立

根据材料力学直梁弯曲表达式[10]: $1/R = M_R / (EJ)$, 又活塞环为一弯曲梁,自由状态下曲率半径为 R , 弯矩为 M_R , 故 $1/R_M = M / (EJ)$ 。当活塞环被压入气缸中,其曲率半径为 R_M , 截面弯矩为 M , 故 $1/R_M - 1/R = (M - M_R) / (EJ)$ 。由于自由状态下,活塞环的弯矩 $M_R = 0$, 故

$$1/R_M - 1/R = M / (EJ). \quad (1)$$

其中, E 为材料的弹性模量; J 为转动惯量。

3.2. 活塞环压力分布函数表达式的建立

活塞环具有对称的结构,其压力随角度变化显示周期性,故可用傅里叶级数来表示[11]:

$$P(\theta) = A_0/2 + \sum_{N=1}^{\infty} (A_N \cos N\theta + B_N \sin N\theta) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } A_N &= 1/\pi \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) \cos N\theta d\theta \\ B_N &= 1/\pi \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) \sin N\theta d\theta \end{aligned} \quad (3)$$

因压力 $P(\theta)$ 为偶函数, $\sin\theta$ 为奇函数, 式(3)变为: $B_N = 1/\pi \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) \sin N\theta d\theta$, $A_0 = 1/\pi \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) d\theta$, $A_0/2 = 1/(2\pi) \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) d\theta = P_0$, $\theta = P_0$ (即压力平均值)。

dP 在 X , Y 轴的两个分量 $dP_X = dP \times \cos\theta = P(\theta) HR_M \cos\theta d\theta$, $dP_Y = dP \times \sin\theta = P(\theta) HR_M \sin\theta d\theta$ 。

由于活塞环在缸套内受力平衡, 故 $\sum dP_x = 0$, $\sum dP_y = 0$, $\sum M = 0$ 。

对环高为 H 、中线半径为 R_M 的环上 C 点单元体上的径向压力为: $dP = P(\theta)HR_M d\theta$ 。

则 $\sum dP_x = \int_{-\pi}^{\pi} HR_M P(\theta) \cos \theta d\theta = 0$ (H , R_M 为定值)。

所以, $A_1 = 1/\pi \int_{-\pi}^{\pi} P(\theta) \cos \theta d\theta = 0$, 式(1)表示为:

$$P(\theta) = A_0/2 + \sum_{N=2}^{\infty} A_N \cos N\theta = P(\theta) = P_0 \left(1 + \sum_{N=2}^{\infty} P_N \cos N\theta \right) \quad (4)$$

其中, P_0 : 压力平均值, P_N : 待定系数。

通过对 P_0 , P_N 各参数的确定, 式(4)可以用来描述各种压力分布。

3.3. 径向位移与弯矩的关系

将自由状态下的曲率 $1/R$ 转变为极坐标下的径向位移形式:

$$\frac{1}{R} = \frac{P^2 + 2P' - PP''}{(P^2 + P'^2)^{3/2}}$$

P : 极坐标下自由型线的矢径, $P = R_M + U$ 。

因为 $P'^2 \ll P^2$, 故忽略 P' , 所以 $\frac{1}{R} = \frac{1}{P} - \frac{P''}{P^2}$ 。

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_M + U} - \frac{(R_M + U)''}{(R_M + U)^2} = \frac{R_M + 2U - U - U''}{R_M^2 \left[1 + 2U/R_M + (U/R_M)^2 \right]} \\ &= \frac{R_M + 2U}{R_M^2 \left[1 + 2U/R_M + (U/R_M)^2 \right]} - \frac{U + U''}{R_M^2 \left[1 + 2U/R_M + (U/R_M)^2 \right]} \end{aligned}$$

由于开口处: $U_s = K_0 \cdot R_M$, 而 K_0 一般取 0.02~0.04 且开口处径向位移 U_s 最大, 故 $U/R_M < 0.05$,

$(U/R_M)^2$ 远远小于 1, 故 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_M} - \frac{U + U''}{R_M^2}$ 。将上式代入(4)中, 得

$$U + U'' = MR_M^2 / (EJ) \quad (5)$$

3.4. 活塞环弯矩表达式

由图1可知, C 点单元体上的径向压力 $dP = P(\theta)HR_M d\theta$, dP 对 C' 点的弯矩:

$$d_M = [P(\theta)HR_M d\theta] R_M \sin(\theta - \psi),$$

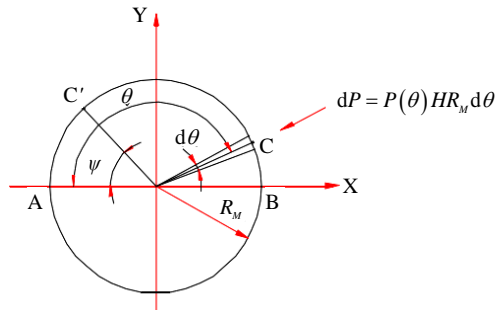


Figure 1. Ring radial pressure diagram
图 1. 活塞环径向压力图

所以, 环从 $\theta = \psi$ 处到开口段的压力对 C' 断面上的总弯矩为 $M = \int_{\psi}^{\pi} HR_M^2 P(\theta) \sin(\theta - \psi) d\theta$, 将式(2)代入

得: $M = P_0 HR_M^2 \int_{\psi}^{\pi} \left(1 + \sum_{N=2}^{\infty} P_N \cos N\theta \right) \sin(\theta - \psi) d\theta$, 经化简计算得到:

$$M = P_0 HR_M^2 \left\{ 1 + \cos \psi + \sum_{N=2}^{\infty} P_N \cos \psi \left[\cos(N-1)\theta / (2N-2) - \cos(N+1)\theta / (2N+2) \right] \right\} \Big|_{\psi}^{\pi} \quad (6)$$

由(5)、(6)两式得:

$$U + U'' = \left[P_0 HR_M^2 / (EJ) \right] \left\{ 1 + \left[1 - \sum_{N=2}^{\infty} P_N (-1)^N / (N^2 - 1) \right] \cos \psi + \sum_{N=2}^{\infty} P_N \cos N\psi / (N^2 - 1) \right\}$$

令

$$K = R_M^4 P_0 H / (N^2 - 1), Z = \sum_{N=2}^{\infty} P_N (-1)^N / (N^2 - 1)$$

$$F(\psi) = K \left[1 + (1-Z) \cos \psi + \sum_{N=2}^{\infty} P_N \cos N\psi / (N^2 - 1) \right],$$

得到: $U + U'' = F(\psi)$ 。

解此二阶常系数非其次微分方程, 可得通解为:

$$U = C_1 \sin \psi + C_2 \cos \psi + K \left[1 + 0.5(1-Z) \psi \sin \psi + \sum_{N=2}^{\infty} \cos N\psi / (N^2 - 1)^2 \right] \quad (7)$$

因 U 在 $(-\pi, \pi)$ 上为偶函数, 且 $C_1 \sin \psi$ 为奇函数, 故 $C_1 = 0$ 。设环的压力曲线对称于开口90度方向, 即 $U(0) = U(\pi)$, 可计算出 $C_2 = K \sum_{N=2}^{\infty} \left\{ 0.5 P_N \left[(-1)^N - 1 \right] / (N^2 - 1)^2 \right\}$, 将 C_1, C_2 的值代入(7), 可得:

$$U = K \left\{ 1 + 0.5(1-Z) \psi \sin \psi + \sum_{N=2}^{\infty} P_N \left[\cos N\psi + 0.5 \left((-1)^N - 1 \right) \cos \psi / (N^2 - 1)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

其中, $K = R_M^4 P_0 H / (EJ), Z = \sum_{N=2}^{\infty} P_N (-1)^N / (N^2 - 1)$ 。

从弯曲梁可知, 中性轴在弯曲前后长度不变, 对矩形环, 其中性轴就是半径为 R_M 的圆, 如图2所示。因为弧长 $A'C' = AC$, 故 $AC = R_M \psi$; 又微元段 $C'D' = P_B d_B$, 所以 $\overline{A'C'} = \int P_B d_B$ 。经化简可得角位移和径向位移关系: $H = (1/R_M) \int_0^{\psi} U d\psi$, 如图3所示。

将上式代入式(8)并化简, 可得出角位移计算公式为:

$$H = (K/R_M) \left\{ \psi + 0.5(1-Z)(\sin \psi - \psi \cos \psi) + \sum_{N=2}^{\infty} P_N \left[(1/N) \sin N\psi + 0.5 \left((-1)^N - 1 \right) \sin \psi \right] / (N^2 - 1)^2 \right\} \quad (9)$$

因此, 对于用余弦函数表达的活塞环的压力分布, 当压力函数表达式确定后, 相应的 Z 中的 P_n 值和 N 值就确定了, 然后就可以通过式(8)和式(9)中 H 和 U 的计算关系算得活塞环从压缩状态恢复到自由状态时各点产生的径向位移和角位移, 从而得出该种压力曲线下该环自由状态下的活塞环型线。

3.5. 模型分析

因为采用的材料或确定的尺寸不同而使式(8)、(9)所得的 U 和 H 有所不同。材料的弹性模量 E 、转动惯量 J 、环高 H 、自由状态下的曲率半径 R 及压入环规后的曲率半径 R_M 会影响相关参数。另外, 因为不同要求的活塞环所受的径向压力分布不同, 式中的弯矩 M_R , 压力平均值 P_0 , P_N 也会使得到的结果大相径庭。因此, 要根据所检测的活塞环的材料、尺寸以及所受的径向压力分布而得到正确的活塞环型线。

3.6. 仿真结果

选取某工厂某种类型的活塞环，根据其用途选取特定的径向压力分布，活塞环受到相应的径向压力的状态，如图4所示(此处用环规模拟受到相应的径向压力分布)，自由状态下活塞环状态如图5所示，将上述推导所得的径向位移和角位移表达式，输入 Matlab 软件，通过图4设置相应的自由度参数，经过多次实验，最后得到自由状态下活塞环型线的仿真图如图6所示。

采用数值分析方法，将图5和图6进行误差分析，结果如图7所示。

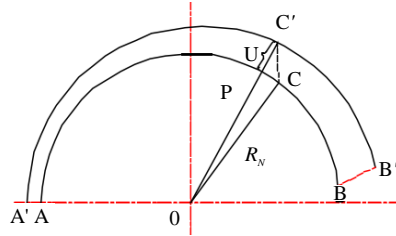


Figure 2. Relationship between the radial displacement and bending moment
图 2. 径向位移与弯矩关系

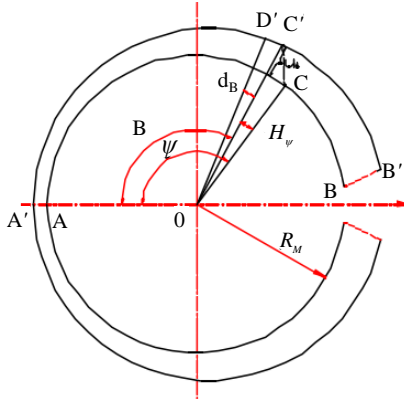


Figure 3. Relationship with angular displacement and radial displacement
图 3. 角位移和径向位移关系

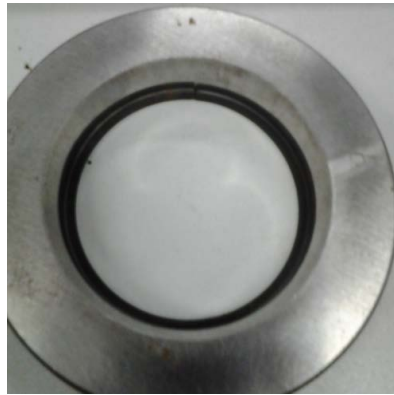


Figure 4. Piston ring inside the ring gauge state diagram
图 4. 活塞环在环规内的状态图



Figure 5. Piston ring state diagram under free state
图 5. 自由状态下活塞环状态图

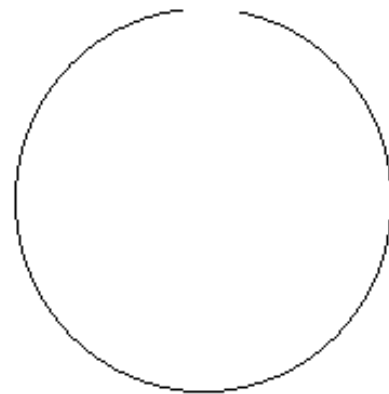


Figure 6. The simulation curve
图 6. 仿真所得曲线

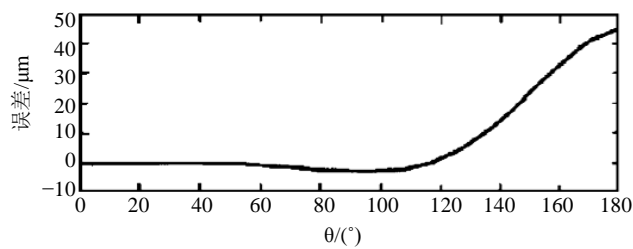


Figure 7. Error analysis diagram
图 7. 误差分析图

4. 结论

本文首先介绍了活塞环的各种径向压力分布类型，主要有均压环的均匀压力分布，不均匀环中高点环的梨形压力分布和桃形压力分布以及低点环的苹果形分布和K形压力分布。在我国汽车工业标准中，推荐采用梨形分布的高点环。其次，本文以中性轴在弯曲前后保持不变作为桥梁，引用材料力学中弯曲梁的定义式，推导出活塞环径向压力分布的表达式；依据径向位移与弯矩的关系，建立二阶常系数非其次微分方程，推导出活塞环从压缩状态恢复到自由状态时各点产生的径向位移和角位移，从而得到该种径向压力下该环自由状态下的活塞环型线。文中又分析讨论了活塞环的材料、尺寸以及所受到的径向压力对得到的活塞环型线的影响。最后，选取某工厂的某种类型的活塞环，根据工作时所对应的径向压力

分布,对文中推导的公式进行参数设定,并进行了仿真,最后将仿真结果和原图进行了误差分析,结果显示,仿真结果和原图误差在准确度以内,即可以选用此方法来检测活塞环的闭口间隙和圆度。

参考文献 (References)

- [1] 易秀明,袁栋,代青龙 (2010) 新型活塞环的润滑密封性分析. *润滑与密封*, **7**, 115-118.
- [2] 李波 (2000) 谈活塞环的检测. *汽车维修*, **9**, 19.
- [3] 王桂棠,朱妙贤,吴黎明,等 (2005) 基于机器视觉的活塞环闭口间隙自动检测. *仪器仪表与检测*, **11**, 80-82.
- [4] 于美玲 (2013) 自由状态下的活塞环视觉检测关键技术研究. 硕士学位论文,广东工业大学,广州.
- [5] 赵高晖 (1994) 活塞环自由状态型线的研究. *内燃机学报*, **5**, 6-9.
- [6] 丁福建 (2000) 活塞环型线设计的理论研究. *内燃机学报*, **2**, 175-179.
- [7] 贾东明,杨燃 (2007) 关于活塞环外圆轮廓线的讨论. *内燃机配件*, **2**, 12-14.
- [8] 黄代凤 (2006) 根据活塞环自由形状求解活塞环压力分布. *内燃机配件*, **6**, 6-8.
- [9] 黄志云 (2012) 内燃机活塞环性能研究. 硕士学位论文,华中科技大学,武汉.
- [10] 孙训方,方孝淑,关来泰 (2009) 材料力学. 高等教育出版社,北京.
- [11] 殷福来 (2003) 活塞环压力特性曲线检测仪器的研制. 硕士学位论文,东南大学,南京.