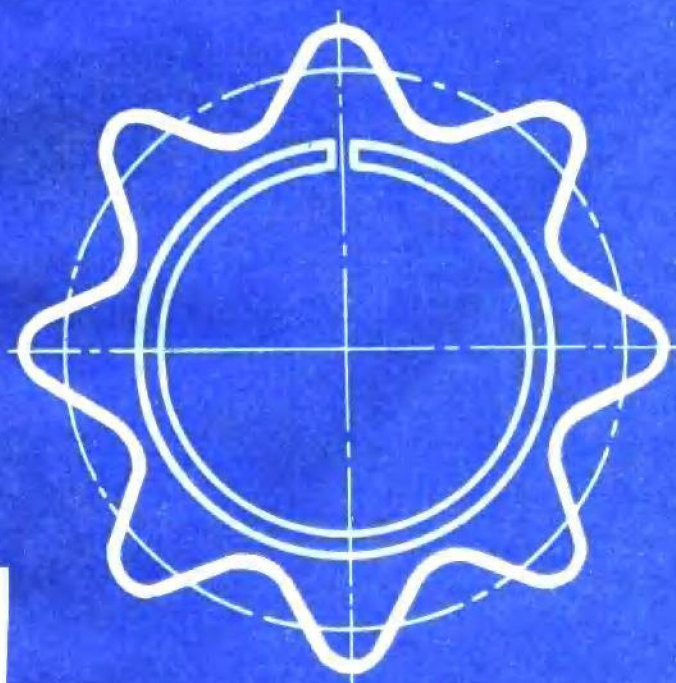


# 活塞环理论

〔苏〕Б. Я. 根茨布尔克 著



机械工业出版社

本书叙述了活塞环理论方面的各种问题：对气缸变形的适应性；磨损时接触压力的重新分布及其寿命；振动问题；自由形状的计算；参数的选择和计算；特殊的制造工艺及检验方法等。

本书可供从事发动机设计、制造的工程技术人员和科技工作者参考。

## Теория поршневого колбца

Б.Я. Гинзбург

Машиностроение

1979

\* \* \*

### 活 塞 环 理 论

〔苏〕Б.Я.根茨布尔克 著

谢仲群 胡继绳 译

冯 中 校

\*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本787×1092 1/32·印张12 $\frac{1}{4}$ ·字数274千字

1986年9月北京第一版·1986年9月北京第一次印刷

印数 0,001—2,500·定价2.90元

\*

统一书号：15033·6033

## 译者序

发动机的不断发展对活塞环提出了种种要求,其中包括寿命长、工作可靠、机油耗量低、摩擦损失小、活塞环组高度小以及成本低等等。活塞环这种外形简单的零件,要实现这些要求,无论是在理论上、还是在实践上都是极为艰巨、复杂的任务。正因为如此,人们只要研究近几年来国内外发表的有关活塞环的大量技术论文,就不难看出,活塞环乃是机械工程领域内近几年来发展最快的零件之一。

“活塞环理论”一书较为全面地概括了这些发展成果。叙述了活塞环对气缸变形的适应性;气缸变形和活塞环磨损时接触压力的重新分布;磨损;寿命;接触压力的修正;第一道环的位置对活塞环工作的影响;振动;自由形状,参数计算以及接触压力分布的测量和特殊结构的活塞环等方面的内容。对每一问题不仅用近代科学技术观点阐明其物理实质,而且还用数学方法特别是电子计算机计算的结果进行分析,再辅以图形和表格,使得叙述条理清楚,深入浅出。因此,本书除了可供从事发动机专业的工程技术人员、科技工作者和大专院校的师生使用以外,对有一定专业基础的读者也可作为参考书。另外,书中还有相当数量的计算举例及其分析,以便于读者掌握和应用有关的内容。

为了对我国发动机的现代化作出贡献,我们将原书译出献给读者。第一章至第八章由谢仲群同志翻译,第九、十两章由胡继绳同志翻译。高级工程师冯中同志在百忙中承担了本书的校订工作,对译稿作了精心的审校,借此机会我们表示衷心的感谢。

#### Ⅳ

由于我们水平所限，错误和不足之处在所难免，敬希读者  
给予指正。

译者 1983.8.2.

---

## 前 言

自身有弹力的开口活塞环已经使用了一百多年，但它还在继续引起设计师、工艺师、研究人员以及发明家的兴趣。致力于活塞环这种似乎很简单的小零件的研究的新的著作和专利也在不断地发表。尽管已积累了大量的知识，但是，活塞环工作中的许多方面，仍然是不清楚的。本书就打算部分地填补一些空白。

三、四十年前建立起来的活塞环对气缸变形的适应性理论和活塞环磨损理论得到了人们的普遍承认。而活塞环磨损理论不仅用于活塞环的计算方面，也被用于其他的领域。例如，技术科学博士 A. III. 拉宾诺维奇 (A. III. Равинович) 利用活塞环的磨损理论，建立起犁铧磨损理论，并促进了“自动磨刃犁铧”和其他农业机械零件的发明创造<sup>(23)</sup>。

本书概括了活塞环理论方面发展的最重要的内容。我们希望，修改后的活塞环理论能适应时代的需要并对实践有所裨益。

## 序

活塞环的功能是保持活塞对气体的密封性。试验表明,除了起动工况以外(4),经过开口间隙的漏气量对发动机性能的影响甚小,仅仅使开口处活塞和活塞环的温度稍有升高(21)。但是,活塞环的端面或外圆窜气,其影响就较大。

在端面密封不良的情况下,高温燃气绕活塞环流过,导致活塞和活塞环过热,润滑油被烤干,活塞环、环槽和气缸的磨损增大并引起这些零件的擦伤。提高活塞环端面和环槽端面的加工精度以及各端面的光洁度,就可以避免出现这些问题。

活塞环与气缸壁之间失去接触时活塞环的受热情况发生急剧变化:它不仅不能把热量传给气缸壁面以得到冷却,反而要受到由活塞环与气缸壁面之间的间隙中流过的高温燃气的加热。这时,活塞环的外表层纤维被加热,曲率发生变化,因而活塞环与气缸壁面之间的透光可能更加增大,也可能缩小,或者甚至于可能消除这种透光(25)。

在高温燃气流经活塞环与气缸之间的透光间隙期中,工作表面的机油被烤干,因而活塞环的摩擦增加,各零件的温度进一步升高。所以,在工作状态下,活塞环与气缸之间不能有透光乃是对气体密封的重要条件。当存在透光时,气体压力既能作用于活塞环的内表面,也能作用于其外表面,这就不能保证活塞环紧贴于气缸壁面上。

但是,如果活塞环弹力产生的接触压力尽管不大,但却能

---

使活塞环各处都与气缸壁贴合，那么，活塞环本身就能保证可靠的气密性。在这种情况下，流到环背间隙中的气体，仅从内表面作用于活塞环上，并在活塞环与气缸之间造成相当大的接触压力。

发动机的强化程度越高，活塞环——气缸这一对摩擦副的耐磨性越好，就越是不允许活塞环与气缸的表面之间出现透光。因为不能依靠磨合来保证活塞环与气缸的接触。所以，在装配发动机时，就应该使活塞环与气缸接触良好。

根据上面的叙述，自然地就会产生下列问题：由于工作时活塞环和气缸都免不了要发生变形，那么，以尽可能高的加工精度制造出来的活塞环和气缸是否就不会失去接触（本书下面叙述的活塞环对气缸变形的适应性理论就要回答这类问题）？活塞环在气缸中的磨合是否总是能促成消除加工缺陷引起的透光？在磨损过程中，活塞环与气缸的接触情况以及活塞环接触压力分布图将怎样变化？根据活塞环磨损过程的基本规律建立起来的活塞环的磨损理论将对这些问题给予回答。

本书中阐明的其他问题反映了与上述基本问题有关的实用的课题，以及我们必然会遇到的某些特殊课题。

## 符号说明

$\Delta = \frac{\Delta EJ}{p_0 r^4}$ ——气缸的尺寸发生变化时，确定活塞环接触压力重新分布的参数（见图9）。

$h$ ——解活塞环磨损方程时，所取角度  $\psi$  的步长。

$i$ ——解活塞环磨损方程时，活塞环圆周分度的顺序号。

$k$ ——解活塞环磨损方程时，用于所取的时间步长  $\Delta Z$  的时间无量纲参数。

$k_0$ ——在活塞环圆周上某处的接触压力降到零的瞬间所对应的时间无量纲参数。

$M$ ——新活塞环装入具有公称直径的正圆形气缸时，在  $\psi$  角处的弯矩。

$M_1$ ——已磨损的活塞环装入具有公称直径的正圆形气缸中时，在  $\psi$  角处的弯矩。

$M'$ ——同变形气缸相接触的活塞环的任意截面 上的弯矩。

$M_{\max}$ ——活塞环装入具有公称直径的正圆形气缸 中时，截面上的最大弯矩。

$m$ ——在活塞环 的任意截面上由气缸变形引起的弯矩。

$p$ ——在正圆形气缸中新活塞环圆周上的接触压力折合到中性轴线单位长度上的变化的接触压力。

$p_1$ ——在正圆形气缸中已磨损的活塞环圆周上的接触压力折合到中性轴线单位长度上的变化的接触压力。

$p'$ ——在变形气缸中活塞环圆周上的接触压力折合到

中性轴线单位长度上的变化的接触压力。

$p_0$ ——具有修正接触压力的新活塞环圆周上的平均接触压力；在特殊情况下也表示圆周上的接触压力折合到中性轴线单位长度上的不变的接触压力。

$p_c = p + p_p$ ——由弹力和衬簧的作用力产生的总接触压力，折合到活塞环中性轴线单位长度上的值。

$p_s = p_1 + p_t$ ——已磨损的活塞环由弹力和气体压力产生的总接触压力，折合到活塞环中性轴线单位长度上的值。

$p_s$ ——活塞环外圆表面上变化的或者不变化的接触压力。

$p_{sm}$ ——新活塞环外圆表面上接触压力的平均值。

$q = p' - p$ ——由于气缸变形产生的接触压力。

$Q$ 和 $Q_1$ ——活塞环对变形气缸的反力（角标表示气缸变形的种类）。

$R$ ——新活塞环在自由状态下中性轴线的曲率半径。

$R'$ ——已磨损的活塞环在自由状态下中性轴线的曲率半径。

$r = 0.5(D - t)$ ——新活塞环装入气缸中时，中性轴线的半径。

$T$ ——活塞环磨损的时间。

$T_0$ ——活塞环假定的理论寿命，即活塞环某处由弹力产生的接触压力降低到零所经历的时间（本书中往后都简称为活塞环的寿命）。

$u$ ——新活塞环从自由状态转变到工作状态时，中性轴线上点的径向位移（见图6）。

$u'$ ——装入变形气缸中的活塞环从自由状态转变到工作状态时，中性轴线上点的位移。

$u_1$ ——装入气缸中的已磨损的活塞环从自由状态转变

到工作状态时, 中性轴线上点的径向位移。

$u_0$ —— $\varphi = 0$  处的  $u$  值。

$v$ ——活塞环同变形气缸之间的透光尺寸。

$X_{\text{H}} = \frac{E}{\sigma} \frac{t}{D} C_M$ ——由于气缸变形使活塞环接触压力重新分布的特性数。

$X_{\text{K}} = \frac{X_{\text{H}}}{\lambda}$ ——活塞环与变形气缸的接触特性数。

$Z = \frac{3cp_0}{t} T$ ——表示活塞环磨损时间的无量纲参数〔见式(173)〕。

$\alpha_0$ ——在变形气缸中活塞环开口附近与气缸脱离接触的角度,  $\alpha = \pi - \alpha_0$ 。

$\beta = \frac{\alpha_1 t^4}{p_0 r^2} = \frac{3\pi}{A/t}$ ——系数〔见式(167)和(170)〕。

$\gamma = \frac{p_r}{p_0}$ ——环背间隙中燃气的平均压力与新活塞环的平均接触压力之比值。

$\delta = \tau/t$ ——活塞环的相对磨损量。

$\Delta_i$ ——第  $i$  阶气缸变形的幅值。

$\Delta_0$ ——气缸公称直径的变形量。

$\Delta = 0.5\Delta_0$ ——正圆形气缸的半径变形量。

$\Delta_{\text{оп}}$ ——气缸的换算变形量〔见式(76)和(77)〕。

$\varepsilon = \frac{eEJ}{p_0 r^4} = \frac{2e}{D_0} X_{\text{H}}$ ——气缸具有椭圆变形时, 确定活塞环接触压力重新分布的参数。

$\xi$ ——与接触压力分布图有关的参数, 〔见式(223)〕。

$\eta$ ——活塞环从工作状态转变到自由状态时, 其截面角度坐标的变化量 (见图 6)。

$\psi$ ——取环脊作为计算角度的起点时, 活塞环工作状态下载面的角度坐标 (见图 6)。

$\psi'$ ——取环脊作为计算角度的起点时, 活塞环自由状

态下截面的角度坐标。

$\varphi = \pi - \psi$ ——见图 6

$\lambda$ ——开口处接触压力与平均接触压力  $p_0$  的比值 (接触压力呈阶梯形分布)。

$\xi$ ——取决于接触压力分布图的常数 [见式 (281)]。

$\rho = r + u$ ——新活塞环自由状态下中性轴线的矢量半径。

$\rho'$ ——已磨损的活塞环装入气缸中时, 中性轴线的矢量半径。

$\tau$ ——活塞环随时间和截面位置 (角  $\psi$ ) 而变化的径向磨损量。

$\omega = \frac{p_0 r^4}{EJ} / A$  ——见式 (293)。

## 关于本书所用单位制的说明

原书使用的是工程单位制, 为避免公式混乱, 本书仍使用工程单位制, 但单位符号均改用国际符号。并列出法定单位与工程单位的换算表。

| 量         | 工程单位                  | 与法定单位的换算                                                       |
|-----------|-----------------------|----------------------------------------------------------------|
| 力         | kgf                   | 1kgf = 9.81N                                                   |
| 长度        | m                     |                                                                |
| 时间        | s                     |                                                                |
| 其他导出单位如下: |                       |                                                                |
| 量         | 工程单位                  | 与法定单位的换算                                                       |
| 质量        | kgf·s <sup>2</sup> /m | 1kgf·s <sup>2</sup> /m = 9.81kg                                |
| 力矩        | kgf·m                 | 1kgf·m = 9.81N·m                                               |
| 压力        | kgf/cm <sup>2</sup>   | 1kgf/cm <sup>2</sup> = 9.81 × 10 <sup>4</sup> N/m <sup>2</sup> |
| 时间        | min                   |                                                                |
|           | h                     |                                                                |
| 温度        | °C                    | 0°C = 273.16K                                                  |

# 目 录

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 第一章 活塞环理论的一般关系式                      | 1   |
| § 1. 活塞环弯曲时曲率的变化                     | 1   |
| § 2. 开口活塞环所受诸作用力的关系式                 | 6   |
| § 3. 不开口活塞环所受诸作用力的关系式                | 9   |
| § 4. 活塞环变形时其中性轴线的微分方程式               | 9   |
| § 5. 卡斯奇里扬诺定理                        | 11  |
| 第二章 活塞环对气缸变形的适应性                     | 12  |
| § 6. 问题的提出                           | 12  |
| § 7. 活塞环与变形气缸配对工作的典型情况               | 12  |
| § 8. 气缸变形在活塞环上引起的附加作用力、弯矩和表面接触压力     | 14  |
| § 9. 具有开口的等压环在变形气缸中接触状态的研究           | 16  |
| § 10. 活塞环在尺寸变化的椭圆形气缸中的情况             | 48  |
| § 11. 圆周上接触压力任意分布的开口活塞环在变形气缸中接触情况的研究 | 53  |
| § 12. 气缸变形的一般情况                      | 78  |
| § 13. 活塞环与变形气缸之间的径向透光尺寸和透光面积         | 82  |
| § 14. 计算举例                           | 91  |
| § 15. 装有衬簧的开口活塞环对气缸变形的适应性的研究         | 101 |
| § 16. 开口活塞环在正圆形气缸和变形气缸中的势能           | 117 |
| 第三章 活塞环磨损过程中接触压力的重新分布 活塞             |     |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 环的寿命·····                                              | 123 |
| § 17. 活塞环磨损时接触压力不能在圆周上保持不变的<br>证明·····                 | 124 |
| § 18. 分析研究活塞环磨损的原始假设·····                              | 126 |
| § 19. 磨损后的活塞环弯矩与径向厚度的关系·····                           | 127 |
| § 20. 活塞环的接触压力与磨损量的关系·····                             | 130 |
| § 21. 在 $p = \text{常量}$ 的情况下, 活塞环的接触压力与磨损量<br>的关系····· | 131 |
| § 22. 环背间隙中气体压力的估算·····                                | 132 |
| § 23. 在 $p = \text{常量}$ 的情况下, 活塞环磨损的微分方<br>程式·····     | 134 |
| § 24. 在 $p = \text{常量}$ 的情况下, 磨损微分方程式的解·····           | 136 |
| § 25. 等压环磨损研究结果的分析·····                                | 153 |
| § 26. 装有衬簧的刮油环在磨损过程中圆周上的接触<br>压力·····                  | 177 |
| § 27. 装有衬簧的气环的磨损·····                                  | 180 |
| § 28. 圆周上具有修正接触压力的活塞环·····                             | 187 |
| § 29. 活塞环的接触压力分布图·····                                 | 191 |
| § 30. 对活塞环修正接触压力分布图的研究和评价<br>方法·····                   | 196 |
| § 31. 修正接触压力活塞环的磨损过程研究结果的<br>分析·····                   | 200 |
| § 32. 接触压力分布图的有效性的评价标准·····                            | 226 |
| 第四章 第一道活塞环在活塞上的位置和节流间隙对<br>活塞环性能的影响·····               | 233 |
| § 33. 基本关系的推导·····                                     | 233 |
| § 34. 计算结果的分析·····                                     | 239 |
| 第五章 活塞环的振动·····                                        | 243 |
| § 35. 基本原理·····                                        | 243 |

|       |                                            |     |
|-------|--------------------------------------------|-----|
| § 36. | 各种参数对活塞环振动的影响·····                         | 258 |
| 第六章   | 活塞环的自由形状·····                              | 261 |
| § 37. | 圆周上的接触压力用三角级数表示的活塞环自由形状·····               | 261 |
| § 38. | 当接触压力沿着圆周呈阶梯形分布、而在各个区段上为常数时, 活塞环的自由形状····· | 270 |
| § 39. | 由各成分分布图的位移相加而得到的修正接触压力活塞环的形状·····          | 273 |
| § 40. | 由活塞环自由形状的偏差引起的接触压力分布图误差的估计·····            | 276 |
| § 41. | 活塞环材料的弹性模数的变化对接触压力分布图的影响·····              | 281 |
| 第七章   | 活塞环参数的计算·····                              | 284 |
| § 42. | 活塞环的应力·····                                | 284 |
| § 43. | 活塞环的结构尺寸·····                              | 294 |
| § 44. | 活塞环对气缸壁的平均接触压力·····                        | 302 |
| 第八章   | 修正压力环的特殊制造方法·····                          | 305 |
| § 45. | 用两次车削成形并在成型鼓筒中中间压缩毛坯的方法制造活塞环·····          | 306 |
| § 46. | 用两次车削成形并在链节夹具上实行中间压缩毛坯的方法制造活塞环·····        | 311 |
| § 47. | 在星形盘上用热定型的方法制造活塞环·····                     | 316 |
| § 48. | 用冷作硬化的方法制造活塞环·····                         | 320 |
| 第九章   | 检查活塞环接触压力分布的特殊方法·····                      | 322 |
| § 49. | 在标准气缸中用锥面环研磨法测量接触压力分布·····                 | 322 |
| § 50. | 单触针式接触压力分布图测定仪·····                        | 324 |
| § 51. | 多支点接触压力分布图测定仪·····                         | 331 |

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| § 52. 用加大直径样圈检查活塞环接触压力分布图的主要<br>参数..... | 339 |
| § 53. 用柔性钢带检查活塞环的椭圆度.....               | 341 |
| § 54. 活塞环平均接触压力和条件弹性模数的计算.....          | 342 |
| 第十章 特殊结构的活塞环.....                       | 344 |
| § 55. 不开口活塞环.....                       | 344 |
| § 56. 内接触压力活塞环.....                     | 361 |
| § 57. 开口处降低接触压力的活塞环.....                | 371 |
| 文献资料.....                               | 374 |

---

# 第一章 活塞环理论的一般关系式

## § 1. 活塞环弯曲时曲率的变化

活塞环是一种具有环形轴线的弹性件，通常位于一个平面内，并承受作用于该平面内的力。因此，研究活塞环变形时，要应用平面曲杆的弯曲理论。

我们先研究受任意力和力矩系 ( $P_1, P_2 \dots, M' \dots$ ) 作用的曲杆  $AC$  (图 1)，力和力矩都作用在曲杆的中性轴线平面内。假想用截面  $aa'$  在任意点  $B$  把曲杆截断并拿掉  $AB$  部分。现在来研究  $BC$  部分，这部分在作用于它上面的外力和作用于截面  $B$  上的弹性内力的作用下处于平衡。外力可以简化为一个合力  $T'$  和力矩  $M'$ 。

弹性内力的诸合力同样可以简化为力  $T$  和力矩  $M$ ，力  $T$  又可以分解为沿截面法线方向的力  $N$  和截面上的剪力  $F$ 。为使  $BC$  部分平衡，必须使  $T = T'$ ， $M = M'$ 。考虑到剪力  $F$  对变形的影响很小，故可以忽略不计。

今后，在本书中，假

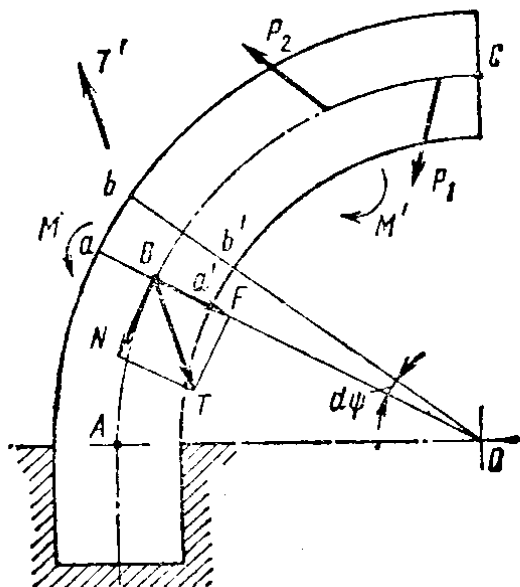


图 1 曲杆承受的力和力矩

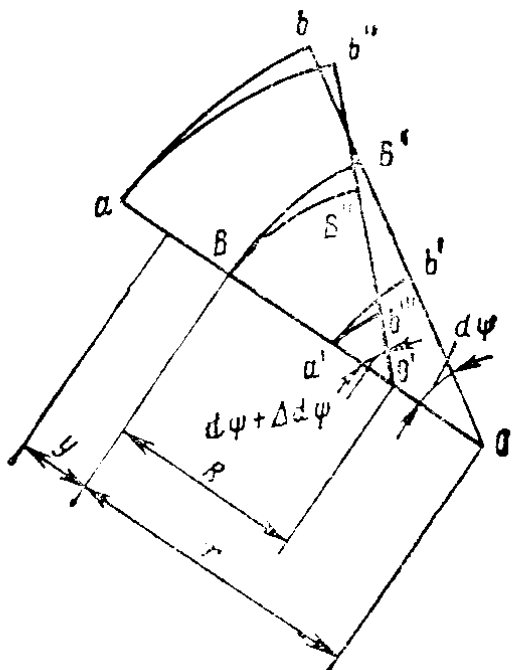
设使曲杆曲率加大的外力力矩为正力矩，使曲杆受拉伸的作用力为正法向力。

用与截面  $aa'$  成  $d\psi$  角的另一截面  $bb'$  将曲杆切下一微段  $aa'b'b$ ，我们来研究这一微段的变形（图2）。在外力影响下，截面  $bb'$  移动到  $b''b''$  处，中性轴线的曲率半径由  $r$  变化到  $R$ ，而切下这一微段曲杆的两个截面之间的夹角  $d\psi$  的变化量为  $\Delta d\psi$ 。这里， $rd\psi$  是切下的这一微段曲杆变形前中性轴线的弧长； $(r+y)d\psi$  是变形前距中性轴线为  $y$  处的纤维的弧长。由此得出，中性轴线的相对伸长为

$$\epsilon_0 = \frac{R(d\psi + \Delta d\psi) - rd\psi}{rd\psi} \quad (1)$$

而距中性轴线为  $y$  处的纤维的相对伸长为

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{(R+y)(d\psi + \Delta d\psi) - (r+y)d\psi}{(r+y)d\psi} \\ &= \epsilon_0 + \frac{y}{r+y} \left( \frac{\Delta d\psi}{d\psi} - \epsilon_0 \right) \end{aligned}$$



$abb'a$ ——变形前的截面

$ab''b''a'$ ——变形后的截面

图2 变形前后的一微段曲杆