

曲线对它们进行讨论。按品级画出它的分布曲线如图 11 所示。由图可见,孔径的大部分尺寸在 0.04 范围内变动,其几率为 90% 以上。只要控制输入能量的大小,就可以改变分布曲线的中心位置。

4. 金相组织

喷油嘴材料为 18CrNiWA, 热处理为氰化处理。我们将激光打孔和电火花打孔的热处理前后的材料做成试片。热处理前两者的金相组织大致相同,一般都为索氏体。热处理之后,两者的组织皆为(马氏体+碳化物+残余奥氏体),但激光的要比电火花打的氰化层深度大得多,碳化物比之多,残余奥氏体比之少,且在最表层还有一层细马氏体的白亮层,因此,激光打的孔的金相组织要比电火花打的为好。

五、存在问题

1. 用激光打出的孔,其入口处有深度约 0.1 毫米厚的烧熔层,外表显得孔径较大,经加内外光阑后无明显改善(因该零件打孔后热处理,热处理后尚需磨去 0.1~0.15 毫米厚一层,因此,该烧熔层对零件使用性能无影响);
2. 机器的稳定性不够高,尚不能满足自动线对激光打孔机的要求;
3. 电气系数的耐压尚需进一步提高。

用全息照相测量发动机活塞的热变形

沈阳仪器仪表研究所激光全息组

全息干涉计量技术是精密测量机械零部件三维微变形的新技术。对具有漫反射表面的物体,这种光学干涉法能够非接触地测量它在热负荷或机械负荷下整体形状的变化,测量精度为光波波长的数量级。

为了正确地确定汽缸活塞的设计尺寸,提高发动机的效率,必须知道活塞受热后变形的情况。我们用全息干涉法初步测量了小轿车发动机活塞的热变形,取得定量的测量结果。

全息干涉技术利用双曝光法或实时法来比较两个有细微差别的物体光波,把物体的变形信息显示为干涉条纹。活塞的热变形是三维的,一般情况下,测量三维形变矢量需要从不同的方位对物体拍摄三张全息图,或者用对单张全息图扫描的办法,所用的装置和解释条纹的方法都较为繁杂。然而,活塞有特定的对称结构,并且要求测定的,只是裙部的径向变形量。因而可以选择比较简单的光学系统进行照相观察,条纹的解算也很简单,而不降低测量的精度。这个方法还适合于其他一些型面对称的物体的形变测量。

一、装 置

1. 光学系统: 图 1 是测试所用的光学系统的示意图。这是一个用平行光作照明光和参考光的全息照相光路。

透镜 L_1 和 L_2 组成准直系统, 把小的激光束扩展成大口径的平行光束。分光镜 B 把这个

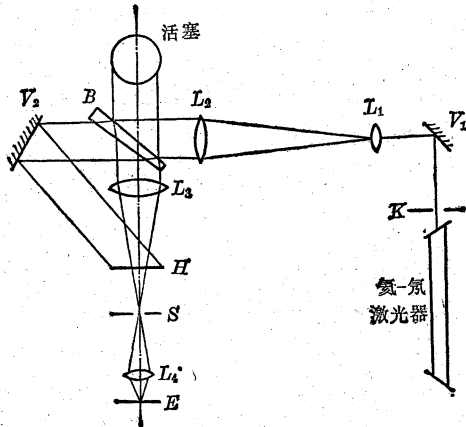


图 1

光束的一部分投向活塞, 经活塞表面漫反射后, 返回并穿过 B , 由视场透镜 L_3 投射到全息底片 H 上, 这是物光。穿过分光镜 B 的另一路光经反射镜 V_2 反射到底片上, 这是参考光。物光与参考光的光程差尽量要小, 在实际测量中, 它小于 10 厘米。

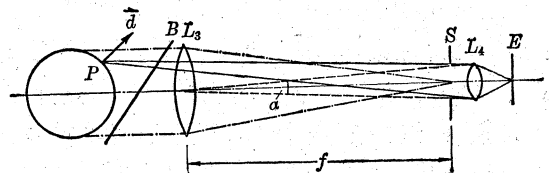


图 2

光阑 S 置于视场透镜 L_3 的焦点上, 这保证了在光阑后面观察或照相时, 接收到来自活塞表面漫反射的光都几乎与观察光轴方向平行。从而可以认为对物体的观察方向是一致的。为了在涉及活塞的全部视场内都能看到干涉条纹, 视场光阑 S 对透镜 L_3 所张的孔径角应满足如下关系式:

$$\alpha < \frac{\lambda}{2d_{\perp}},$$

或

$$d_{\perp} < \frac{\lambda f}{2S},$$

$$\alpha = \frac{S}{f},$$

式中各符号是: α ——光阑对 L_3 张的孔径角, f ——视场透镜 L_3 的焦距, S ——视场光直径, λ ——激光波长, d_{\perp} ——活塞表面垂直于光轴方向的位移。

光阑 S 的存在, 增加了成像透镜 L_4 的焦点深度, 使景深范围增大, 这对拍摄清晰的物体和干涉条纹的象来说, 是有利的。另一方面, 它使成像透镜的分辨率降低。由于变形越大, 所产生的干涉条纹就越密, 分辨率降低, 将使能够测量的变形量的大小受到限制。但在本实验测量的变形范围内, 成像系统的分辨率是足够的。

系统中各主要部件的参数如下:

氦-氖激光器, 单模, 功率约 10 毫瓦;

准直透镜 L_2 , ϕ 84 毫米, 焦距为 1000 毫米;

视场透镜 L_3 , 焦距为 550 毫米;

分光镜 B , 反射率 50%;

视场光阑, 孔径 ϕ 15 毫米。

在底片 H 上, 参考光和物光的光强比为 8:1。在这个比例下, 双曝光法和实时法都能观察到清晰的干涉图象。使用天津感光胶片厂的全息干版, 曝光时间约 30 秒。双曝光时每次 15 秒。

进行实时全息照相时, 为了确保底片位置不变动, 就在底片夹持架上对底片进行就地显影和定影处理。全息底片经过显影、定影处理后, 由于感光乳胶收缩而出现干涉条纹。要消除这种收缩而引起的效应, 可以用适当浓度的三乙醇胺溶液浸泡处理。

2. 活塞的支承, 加热和测温: 由于测量过程中要对活塞加热, 支承它的夹具自然也会受热膨胀, 这势必引入测量误差, 甚至会使测量无法实现。因此必须采用适当的支承和加热方法, 使活塞受热升温时, 夹具基本不变形或者变形仅仅是沿着活塞轴线方向的位移。这个前提条件得到保证以后, 测量到的变形量才可以认为是活塞自身的热变形。

为了解决上述问题, 活塞用石英棒从底部中心处支承, 石英棒的另一端牢固地夹持在铁底座上。石英棒和活塞之间用高温环氧树脂粘合。

用小电炉从底部对活塞加热, 电炉能够灵活地接近和离开活塞。当活塞被加热升温时, 其上的温度场很不均匀, 下部温度高, 上端温度低, 差别很大。只有当热源撤除, 活塞自然冷却到接近室温时, 其上的温度梯度才很小。因此, 对活塞热变形进行的定量测量, 应该在活塞自然冷却期间, 选择在合适的温度区间内进行。在这个区间内, 活塞上的温度场大致是均匀的。

采用稳定性好, 灵敏度高, 响应快的碳化硅热敏电阻做测温元件。热敏电阻用掺铜粉的 914 胶合剂紧密地粘贴在活塞的适当位置上。

二、测量和条纹的解释

全息干涉计量的两个主要环节是拍摄全息图和解释从全息图显示出来的干涉条纹。解释干涉条纹的基本问题是找出观察点——物体表面各点——光源三者之间总光程的变化, 并由此来解算形变矢量。

光程的变化是与干涉图上的条纹级相联系的。设 P 是物体表面上的一点。物体发生微小变形后, P 点移动到新的位置 P' 点。如果相应的光程变化为所用激光波长 λ 之半的奇数倍, 则变形前后的两个光波干涉时; 在 P 点处两光波的强度相互抵消, 成为暗点。暗点相连形成暗条纹。反之, 如果光程变化为 λ 的整数倍, 则形成亮条纹。倘若物体表面上的某些区域没有位移, 这些地方也将出现亮条纹, 并称作零级干涉条纹。从零级条纹算起, 光程变化 δ 为 $m\lambda$ 处的条纹的干涉级 m 。也就是

$$\delta = m\lambda \quad (1)$$

这个公式表示, 位于第 m 级条纹上的点, 其相应的光程变化为 $m\lambda$ 。

活塞受热时, 整体变形, 其表面的每一点的位置都发生变化。因而从双曝光全息图去看, 其表面不出现零级条纹。这就需要通过实时观察活塞热变形时的干涉图, 直接数出变形过程中表面上某一点上掠过的条纹数, 也就是这一点的条纹级, 从条纹级为 m 的条纹到相邻的一个条纹, 干涉级数发生 $+1$ 或 -1 的变化。根据实时观察到的条纹源的位置和条纹移动的方向, 可以判断符号是“+”或“-”。据此, 参照某一点的条纹级和双曝光干涉图, 可以确定活塞表面各点的条纹级。从而, 每一点对应的光程的变化也就知道了。

从某一点的光程变化去推算这点的形变矢量, 是个几何问题。图 1 所示的光路有如下特点:

- (1) 平行光照明物体;
- (2) 从观察点去看,对活塞表面各点的观察方向几乎是平行的;
- (3) 照明光和观察光相互平行,方向相反。

这样的光学布局使得光程变化与形变矢量的关系简单明了。设 P 点的形变矢量为 \vec{d} , 照明方向和观察方向的单位矢量分别用 \vec{k}_1 、 \vec{k}_2 表示。从图 3 看到:

$$\delta = \vec{d} \cdot (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) = 2d \cos \beta \quad (2)$$

代入(1)式得到

$$d = \frac{m\lambda}{2 \cos \beta} \quad (3)$$

根据活塞裙部的对称性,假定裙部各点的热变形矢量的方向和半径方向一致。这时,形变矢量和观察方向的夹角 β 就是表面各点的平面方位角。事实上,这种光学安排直接的测量结果是平行于观察方向的位移量,对垂直于这个方向的位移,它是不敏感的。

假若裙部各点的变形不是径向的,而和半径有一个夹角 $\theta - \beta$, 这时要用下面的方法来测量。

如图 4 所示,测量点是 Q , θ 是 Q 的平面方位角, β_1 是 Q 点的形变矢量 \vec{d} 与观察方向的夹角。

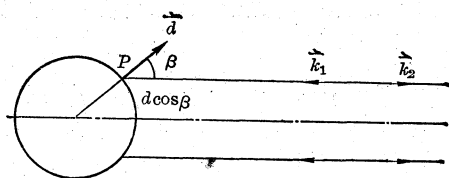


图 3

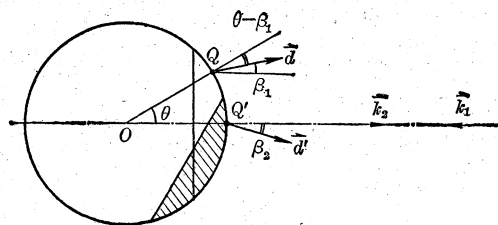


图 4

第一次测量操作如前所述,得到方程式

$$m_1 \lambda = 2d \cos \beta_1 \quad (4)$$

然后将活塞绕其对称轴转过一个角度 θ , 使 Q 点转动到 Q' 点。这时对应的形变矢量为 \vec{d}' 。 \vec{d}' 与 \vec{k}_2 的夹角为 β_2 , 则

$$\begin{aligned} |\vec{d}| &= |\vec{d}'|, \text{ 或 } d = d', \\ \beta_2 &= \theta - \beta_1 \end{aligned} \quad (5)$$

这时再进行第二次测量操作,得出

$$m_2 \lambda = 2d' \cos \beta_2$$

或

$$m_2 \lambda = 2d \cos \beta_2 \quad (6)$$

m_1 、 m_2 由实验得到, θ 是已知的, 联立方程 (4)、(5)、(6), 即可解出 d 和 β_2 , 于是矢量 \vec{d} 完全确定。

三、测试结果

(1) 活塞的温度场: 使用 4 个碳化硅热敏电阻测量活塞的温度场。它们粘贴在活塞表面, 位置如图 5 所示。

活塞从室温 16°C 开始加热,然后自然冷却。从 30°C 降到 18°C , 在这个区间内, 4 个电阻的指示温度最大差值不超过 1°C , 裙部 2 个电阻的指示温度的最大差值不超过 0.5°C 。这表明在比室温高 14°C 到室温的降温区内, 活塞上的温度分布大致是均匀的。

温度测量误差估计为 $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$, 主要包括热敏电阻的精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 测量先后时间延迟 (测量 4 个电阻所需时间小于 30 秒), 以及热传导滞后带来的误差。

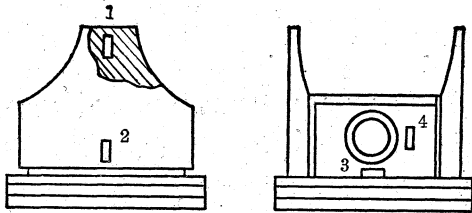


图 5 热敏电阻粘贴位置

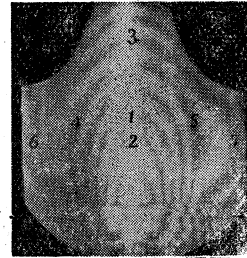


图 6 温差 10°C 的活塞双曝光全息图

(2) 活塞裙部的热变形: 从实时法观察到裙部的条纹源在裙部的中下方。升温时条纹一个接一个地从这里往上冒, 降温时条纹一个个往下移, 在这里消失。温度降低 10°C , 掠过 1 点的条纹数为 27 个。结合这个温差下的双曝光全息图 (图 6), 找出裙部各测量点的条纹级。各测量点的方位角在实物上直接量出。然后, 根据公式 (3) 计算出各点的径向热变形量 d , 列于表 1 中。

在实时观察中, 靠眼睛读出条纹数, 分辨能力为一个条纹。

表 1 各测量点热变形量

$\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$

$\lambda = 0.633$ 微米

项 目	测 量 点 序 号							
	1	2	3	4	5	6	7	
条 纹 级 m	27	28	24	25	25	24	24	
方 位 角 β (度)	0°	0°	0°	$22^{\circ}30'$	$22^{\circ}30'$	41°	41°	
热 变 形 量 d (微米)	8.6	9.3	7.7	8.7	8.7	10	10	

四、结 语

我们利用实时法和双曝光法两种全息照相干涉技术, 测量了发动机活塞的热变形, 得到活塞裙部在室温附近的热变形数据, 这为活塞的设计, 提供了某种参考。

针对活塞结构的对称性和变形特点, 采用图 1 表示的全息光路, 测量方法和条纹解释都是简明的。从这个光路直接测量到的结果, 是一维变形量。根据工件的对称性和变形特点, 能够求出二维的形变矢量。

分析零部件热变形的工作, 一般应该在降温区内进行。在这个区域内, 不难实现稳定的测量条件。已进行的测量还局限于室温附近。高温下的热变形分析, 需要另外的加热设备。