

# 复合材料发动机机体的粘弹性分析\*

张 力      张 恒      闻荻江  
(洛阳工学院)      (郑州大学)      (苏州大学)

**摘 要** 对采用可溶性合金型芯整体模压成型的复合材料发动机机体,用三维有限元方法对其进行了应力场和位移场粘弹性研究,建立了机体用复合材料的粘弹性力学模型,反映了机体的变形规律,获得更精确的应力场和位移场。通过机体的动态实时测试,验证了计算结果的正确性。

**关键词** 复合材料 发动机机体 粘弹性分析 有限元

采用复合材料代替金属材料制造汽车、拖拉机和农用机械发动机机体在减轻重量、节约能源和减少环境污染等方面有重要意义。1987年美国首先研制成功 Polimotor Model 234 复合材料发动机,其机体由玻纤/酚醛复合材料制成,功率为 129kW,自重为 79kg,仅为同类金属机体的一半,而批量生产成本低于金属机体<sup>[1]</sup>。西欧国家也相继研制出复合材料发动机。国内尚未见到复合材料发动机机体的研究报导<sup>[2]</sup>。洛阳工学院复合材料研究所与其它合作单位近期研制成一种 DA 462Q 型复合材料发动机机体,该复合材料机体在制造工艺方面不同于国外已有的热压罐或模压组件组合式成型,而是采用先进的可溶性合金型芯整体模压成型。对复合材料机体的位移场和应力场分析目前尚无十分有效的方法,笔者曾对所研制的机体进行过线弹性有限元分析<sup>[3]</sup>,但机体所选用的聚合物基复合材料在发动机机体的工作温度下变形行为具有粘弹性特征。在工程实际中,可以明显地观测到复合材料结构的粘弹性变形。这种粘弹性特性,特别是蠕变特性,在复合材料结构设计中作为一种重要因素来考虑。本文对机体进行粘弹性分析以获得较精确的应力场和位移场计算结果。

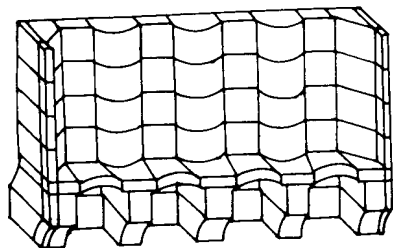


图1 机体的有限元模型

Fig. 1 Finite element model  
of the engine block

## 1 计算模型和结构离散

DA 462Q 复合材料发动机的机体为预应力螺杆复合式结构,由玻纤/改性酚醛复合材料制成。取机体一半进行有限元网格划分,沿机体长度方向划分五块,采用三维 20 节点等参数单元(图 1)。载荷计算时分别考虑各缸工作时产生的最大燃气压力、主轴承载荷、活塞连杆相对气缸的侧压力和发动机自重<sup>[3,4]</sup>。

## 2 机体用复合材料粘弹性模型及参数识别

### 2.1 积分型本构关系<sup>[5]</sup>

收稿日期: 1998-06-16      1999-02-05

\* 国家自然科学基金资助项目(59575014)

张力,副教授,博士生,洛阳市涧西区 洛阳工学院农机系, 471039

机体所用复合材料的三维线粘弹性性质, 可用积分型本构关系描述为

$$\sigma_{ij}(x, t) = \int_{-\infty}^t G_{ijkl}(x, t - \tau) \frac{\partial e_{ij}}{\partial \tau}(x, \tau) d\tau \quad (1)$$

其中,  $\sigma_{ij}$  为应力张量,  $e_{ij}$  为应变张量,  $G_{ijkl}$  是一个四阶张量, 称为材料的张量松弛函数。方程 (1) 称为积分型松弛函数, 它也可以写成

$$e_{ij}(x, t) = \int_{-\infty}^t J_{ijkl}(x, t - \tau) \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial \tau}(x, \tau) d\tau \quad (2)$$

方程 (2) 称为积分蠕变型本构方程, 四阶张量  $J_{ijkl}$  称为张量蠕变函数。若变形始于时刻  $t = 0$ , 则  $\sigma_{ij} = e_{ij} = 0 (t < 0)$ , 方程 (1) 化为

$$\sigma_{ij}(x, t) = e_{ij}(x, 0_+) G_{ijkl}(x, t) + \int_0^t G_{ijkl}(x, t - \tau) \frac{\partial e_{ij}}{\partial \tau}(x, \tau) d\tau \quad (3)$$

## 2.2 微分型本构关系<sup>[5]</sup>

机体所用材料的线粘弹性性质, 可以用三元件 Voigt 模型来描述。图 2 所示为 Voigt 模型, 图中  $\sigma$  代表应力,  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  代表应变,  $E_1$  和  $E_2$  代表弹性模量,  $\eta$  为粘性系数。

三元件的 Voigt 模型中, 其剪切模量函数  $G(t)$  和体积模量函数  $K(t)$  分别为<sup>[6]</sup>

$$G(t) = G_0 + G_1 \exp(-t/\tau) \quad K(t) = K \quad (4)$$

对机体用短切玻纤/酚醛复合材料, 玻纤随机分布, 在任意方向上具有相同的强度, 属于各向同性应力应变材料, 有三个独立的粘弹性函数。由实验确定其剪切模量  $G_0 = 2.0 \text{ GPa}$ ,  $G_1 = 1.9 \text{ GPa}$ , 体积模量  $K = 7.7 \text{ GPa}$ , 延迟时间  $\tau = 3600 \text{ s}$ 。

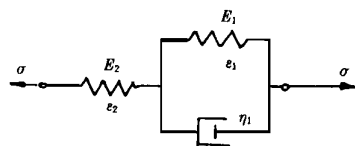


图 2 三元件 Voigt 模型图

Fig. 2 Three elements Voigt model

## 3 粘弹性有限元方程

对等温三维粘弹性本构关系, 式 (1) 还可以写成矩阵形式

$$\{\sigma\} = [C_0]\{\epsilon\} + \int_{0_+}^t \frac{\partial G(t - \tau)}{\partial \tau} [C_1]\{\epsilon\} d\tau \quad (5)$$

其中,  $[C_1]$  是常数矩阵,  $[C_0]$  是由体积模量  $K$  和剪切模量  $G(0)$  确定的矩阵。

根据虚功原理构造有限元方程

$$\int_{V_e} [B]^T \{\sigma\}(t_k) dV = \{P_A^e(t_k)\} \quad (6)$$

式中,  $V_e$  为元素的体积;  $[B]$  为几何矩阵;  $\{P_A^e(t_k)\}$  为元素上的体力和面力引起的等效节点载荷, 其中的积分采用梯形数值积分法则。得到元素有限元方程

$$\{[K_0]^e\} + [K_1]^e [G(0) - G(t_k - t_{k-1})] \{\delta(t_k)\} = \{P_A^e(t_k)\} + \{P_M^e(t_k)\} \quad (7)$$

式中,  $\{\delta(t_k)\}$  为元素节点的位移矢量,  $\{P_M^e(t_k)\}$  为元素节点的记忆载荷,  $[K_0]^e$  和  $[K_1]^0$  为元素刚度矩阵。

将元素基本方程迭加, 即得全结构的有限元方程

$$\{[K_0] + [K_1]\} [G(0) - G(t_k - t_{k-1})] \{\delta(t_k)\} = \{P_A(t_k)\} + \{P_M(t_k)\} \quad (8)$$

其中,  $[K_0]$  和  $[K_1]$  为全结构的刚度矩阵,  $[K_0]$  由几何矩阵  $[B]$ 、坐标变换矩阵  $[T]$ 、 $[C_0]$  确定,  $[K_1]$  由  $[B]$ 、 $[T]$ 、 $[C_1]$  确定。

利用方程(8), 采取适当的时间增量步长, 可以逐步算出  $t_k$  时刻的节点位移, 然后由下式求出  $t_k$  时刻的单元应力

$$\{\sigma(t_k)\} = [T][C_0][T]^T\{e(t_k)\} + [C_1] + \int_0^{t_k} \frac{\partial}{\partial \tau} [T]G(t-\tau)[T]^T\{e(\tau)\}d\tau \quad (9)$$

4 数值计算结果与实验结果的比较

4.1 计算结果

使用自编的前置处理软件, 根据前述的网格划分形成计算数据, 利用有限元通用软件包在微机上运算, 对输出的结果利用自编的后处理程序进行分析。由计算结果可知, DA 462Q 型复合材料发动机机体的最大位移发生在 4 缸最大爆发压力时, 该缸附近的缸体螺栓处, 表 1 给出该节点在 0, 0.5, 1.0, 1.5, . . . . . 5s 汽缸轴线方向的位移和应力。

最大位移发生在 4 缸工作时在该缸附近的缸盖螺栓处, 这是由于以下原因造成的: 在 4 缸工作时, 4 缸处螺栓受力, 因 4 缸外侧仅有 2 个螺栓, 且机体后端壁较薄, 故螺栓受力较大; 在 4 缸处机体外侧无加强筋, 此处刚度较弱。

4.2 动态性能实验

实验用复合材料发动机的机体材料为玻璃纤维增强酚醛树脂, 机体的制作工艺是采用先进的可溶性合金型蕊整体模压成型。

采用装机实验, 用电测法对 DA 462Q 型复合材料发动机机体进行了动态实时测试。按有限元计算的应力场, 在危险部位进行布片, 以便对机体应力的粘弹性有限元计算结果进行试验验证。根据磁带记录器记录的机体应变响应, 在微机上通过计算机数据处理程序, 可以得到不同时刻测点的位移和应力等。

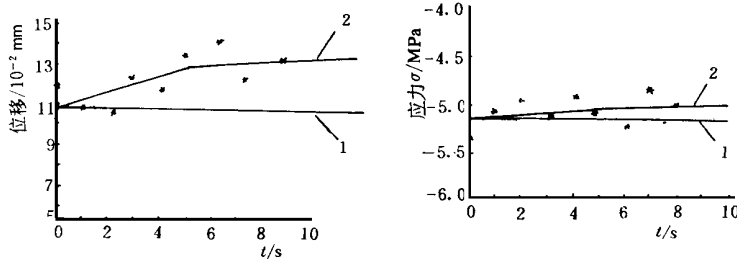
4.3 计算值与实验值的比较

在 4 缸为工作缸时该缸缸体的螺栓处, 最大爆发力和机体上的其它作用力使螺柱产生拉伸, 由于机体材料的粘弹性行为, 机体在螺栓处的应变缓慢地恢复, 缸体螺栓处节点在汽缸轴线方向滞后不同时刻的位移曲线和应力曲线如图 3 所示。

表 1 最大位移点的位移和应力

Tab 1 The stresses and displacements at the maximum displacement node

时间 /s	位移 /mm	应力 /N · mm <sup>-2</sup>
0	0.107767	- 5.266
0.5	0.107775	- 5.265
1.0	0.108972	- 5.262
1.5	0.111394	- 5.253
2.0	0.113816	- 5.244
2.5	0.116238	- 5.235
3.0	0.118660	- 5.226
3.5	0.121082	- 5.217
4.0	0.123504	- 5.208
4.5	0.125926	- 5.199
5.0	0.128348	- 5.190



\* —实验值 ————计算值 1—线性有限元分析<sup>[3]</sup> 2—粘弹性有限元分析

图 3 位移、应力曲线

Fig 3 The displacement and stress curves



由图 3 的粘弹性位移曲线可以看到, 开始有一位移值, 随着时间的推移, 位移缓慢增加, 这是由于机体材料的粘弹性造成的, 在受力时机体的粘弹性会使它首先表现出弹性材料的性质即突然发生变形, 然后随时间的持续作缓慢的持续变形。

由计算结果可知, 在工作缸缸盖的螺栓处, 最大爆发力和机体上的其它作用力使螺栓产生拉伸, 由于机体材料的粘弹性, 机体在该部位产生粘弹性恢复变形, 该变形在 5 秒内滞后很小。缸盖与机体之间存在着微小间隙, 在该间隙下, 由于密封作用没有渗漏。经实际装机运行, 未见机体发生渗漏。

## 5 结 论

1) 计算值和实验值基本吻合, 说明本文所采用的粘弹性模型和粘弹性有限元方法是可行的, 反映了复合材料发动机机体的变形规律。

2) 在聚合物基复合材料发动机机体的结构分析中必须考虑结构的粘弹性, 线性分析不符合实际。

3) 采用先进的可熔性型芯整体模压成型制作的 DA 462Q 型复合材料发动机机体, 最大位移发生在 4 缸工作时在该缸附近的缸盖螺栓处, 螺栓产生拉伸, 由于机体材料的粘弹性, 机体在该部位产生粘弹性滞后变形, 该变形在 5 s 内滞后很小, 在此间隙下, 由于密封作用, 未见机体发生渗漏。

## 参 考 文 献

- 1 L Brooke Polimotoring to production Automotive Industries, 1988, 2(152): 38~ 40
- 2 李顺林主编 复合材料进展 北京: 航空工业出版社, 1994 1269~ 1279
- 3 张力等 复合材料发动机机体应力场的数值计算与试验研究 汽车技术, 1998(6): 21~ 23
- 4 万欣等 内燃机设计 天津: 天津大学出版社, 1989 47~ 252
- 5 杨挺青 粘弹性力学 武汉: 华中理工大学出版社, 1990 8~ 39
- 6 [日]山田嘉昭著 非线性有限元法基础 钱仁耕, 乔端译 北京: 清华大学出版社, 1988 273~ 278

## Viscoelastic Analysis of the Composite Engine Block

Zhang Li

(Luoyang Institute of Technology, Luoyang)

Zhang Heng

(Zhengzhou University)

Wen Dijiang

(Suzhou University)

**Abstract** Polymer composites present the behaviours of the viscoelastic under the working temperature of the engines. The space and time have to be taken into account in the calculation because the mechanical components vary with both space and time. In this paper the viscoelastic stresses and the displacements of the composite engine block, which is shaped by moulding of meltable alloy core, were analyzed by three-dimension finite element method. The viscoelastic model of the composite engine block was set up and can express the deformation of the block. The accurate stress and displacement fields can be obtained. The calculation results were found in good coincidence with the testing results.

**Key words** composite, engine block, viscoelastic analysis, finite element method