2002

文章编号: 1000-3851(2002)01-0113-04

### 复合材料飞轮的三维应力分析

### 宫能平1, 夏源明1, 毛天祥2

(1. 中国科学技术大学 力学与机械工程系, 合肥 230027; 2 中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

高速旋转的飞轮在给定外径和质量的情况下, 轮缘采用先进的碳纤维缠绕, 提高飞轮的转速, 从而增大 飞轮的储能密度, 解决了飞轮轮缘因高速旋转而断裂破坏的问题。 本文采用三维实体元分析计算复合材料飞轮工 作时的应力分布, 为安全合理设计复合材料飞轮提供依据。

复合材料飞轮; 储能密度; 应力分析; 有限元

中图分类号: 文献标识码: A TK512

### DESIGN OF COMPOSITE FLYWHEEL STRUCTURE AND ITS STRESS ANALYSIS

GONG Neng-ping<sup>1</sup>, XIA Yuan-ming<sup>1</sup>, MAO Tian-xiang<sup>2</sup>

(1. Dept of Mechanical Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2 Institute of Mechanics, A cademy of Science of China, Beijing 100080, China)

Abstract The use of advanced carbon-fiber composite on a flywheel rotor results in not only the increase of energy density by increasing the rotating speed when the outer diameter and mass are fixed, but also solution of the fracture problem of the flywheel rotor. The calculation on the stress distribution is conducted in the present paper according to the working situation of the flywheel These provide the basis for proper design of composite flywheels

composite flywheel; energy density; stress analysis; finite element Key words:

飞轮储能是一项早已在机械工程中广泛应用的 技术。传统的金属飞轮,受材料强度的制约,限制了 转速的提高,储能密度较低。而采用碳纤维缠绕的复 合材料飞轮具有重量轻、强度大、储能密度高的显著 特点,目前一些发达国家已开发出用于汽车能源的 复合材料飞轮[1~2]。 衡量复合材料飞轮储能能力的 大小有一个指标-储能密度。 其表达式为

$$K_E = \frac{E}{m} = \frac{\frac{1}{2} m R^2 \omega^2}{m} - \frac{\sigma}{\rho} \tag{1}$$

其中, E 为动能  $\omega$ 为角速度  $\sigma$ ——飞轮轮缘材料的 强度、 $\rho$ ——飞轮材料的密度。式(1)表明储能密度与 角速度的平方成正比: 同时它还与轮缘材料的强度 成正比, 与材料密度成反比。这是一个崭新的设计思 想, 采用碳纤维缠绕的复合材料飞轮正是这种设计 思想的体现。复合材料飞轮的结构简图参见图 1。

若把复合材料飞轮简化为轴对称转动圆盘, 则 可得到平面应力状态下的解析解。对仅受径向惯性

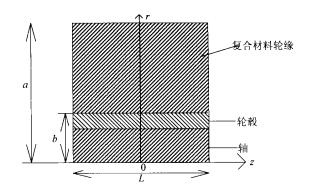


图 1 复合材料飞轮轮缘结构示意图

Fig 1 Schematic diagram of composite flywheel structure

力用的平面应力状态复合材料飞轮圆环, 其应力场

$$\sigma_{r} = \rho_{\omega}^{2} \frac{3 + v_{\theta}}{9 - \lambda^{2}} \left[ \frac{k^{-\lambda - 1} - k^{2}}{k^{-\lambda - 1} - k^{\lambda - 1}} \left( \frac{r}{a} \right)^{\lambda - 1} - \left( \frac{k^{-\lambda - 1} - k^{2}}{k^{-\lambda - 1} - k^{\lambda - 1}} - 1 \right) \left( \frac{r}{a} \right)^{-\lambda - 1} - \left( \frac{r}{a} \right)^{2} \right]$$
(2)

收稿日期: 2000-05-17; 收修改稿日期: 2000-07-05

作者介绍: 宫能平(1964), 男, 博士, 主要从事复合材料力学与断裂动力学方面的研究。

$$\theta = \rho \omega^{2} \frac{3 + \nu \theta}{9 - \lambda^{2}} \left[ \lambda \left( \frac{k^{-\lambda - 1} - k^{2}}{k^{-\lambda - 1} - k^{\lambda - 1}} \right) \left( \frac{r}{a} \right)^{\lambda - 1} + \lambda \left( \frac{k^{-\lambda - 1} - k^{2}}{k^{\lambda - 1} - k^{\lambda - 1}} - 1 \right) \left( \frac{r}{a} \right)^{-\lambda - 1} - \frac{\lambda^{2} + 3\nu \theta}{3 + \nu \theta} \left( \frac{r}{a} \right)^{\frac{7}{2}} \right]$$
(3)

其中  $\lambda = \sqrt{\frac{E_{\theta}}{E_{\phi}}}; \quad k = \frac{b}{a}; \quad \lambda \theta$  泊桑系数

式 (2)、式 (3) 表明, 飞轮中径向应力  $\sigma$ 、环向应力  $\sigma$ 都与  $\omega$  成正比, 考虑材料强度的限制, 故不可能用无限提高转速的方法。提高飞轮整体储能。由于实际的飞轮结构不可能是旋转圆盘, 而是一个旋转圆柱体, 且在工作状态下, 复合材料飞轮处于三维应力状态, 对于三维应力状态下的复合材料飞轮分析不能采用解析方法求解, 故笔者采用三维有限元法对飞轮进行分析, 通过计算、分析和讨论为复合材料飞轮设计提供初步依据。

### 1 复合材料飞轮应力状态的三维有限元分 析

设飞轮尺寸为 a=150 mm, b=50 mm, L=400 mm, 转速 n=20000 转/分, 采用三维实体单元(见图2), 对复合材料飞轮进行有限元离散。为了分析问题

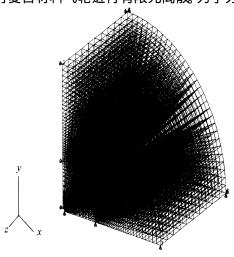


图 2 应力计算的有限元网格 Fig 2 Mesh of finite element analysis

的方便, 暂不考虑预应力和温度应力的影响。 轮轴和轮毂为各向同性材料, 其材料参数为 E=200 GPa, Y=0.25。复合材料轮缘为正交各向异性材料, 其材料参数为:  $E_{11}=12.4$  GPa,  $E_{22}=147.8$  GPa,  $E_{33}=12.4$  GPa,  $G_{12}=2.0$  GPa,  $G_{23}=2.0$  GPa,  $G_{13}=5.0$  GPa,  $Y_{12}=0.01$ ,  $Y_{13}=0.25$ ,  $Y_{23}=0.25$ , P=2700 kg/m³。有限元计算采用了 12000 三维实体单元, 且在材料交界面附近单元加密。采用ABAQUS 程序对下面二种工况下飞轮进行应力分析:

## 1 1 飞轮角速度 $\omega = 20000$ 转/分, $\hat{\omega} = 0$ 角加速度时的应力分布(见图 3~ 图 12)。

图 3~ 图 12 表明, 在匀速转动飞轮中 & 沿径向

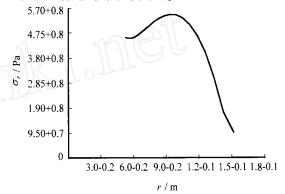


图 3 z=0 处  $\sigma$  沿径向变化曲线

Fig 3 Distribution of radial stress along radius direction

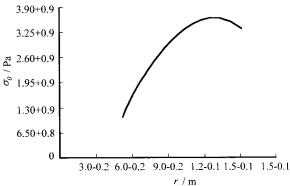


图 4 z= 0 处 09 沿径向变化曲线

Fig 4 Distribution of circum ferential stress along radius direction

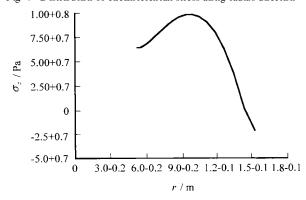


图 5 z=0 处  $\alpha$  沿径向变化曲线

Fig 5 Distribution of axial stress along radius direction

# 1 2 飞轮角速度 $\omega$ = 20000 转/分, 角加速度 $\omega$ 0 时的应力分布

飞轮工作时需要快速冲、放电,即角加速度

ω 0对应力的影响必须考虑。计算结果表明,在角速度相同的情况下,加速转动时,飞轮中所有正应力与匀速转动时相比,在分布规律上都是一致的;且 σ, α, 的数值完全相同(图略);但 τα, τα.不等于零; τα 的数值略有增大; α 的数值也略有改变。上述分析揭示了角加速度的存在仅对剪应力的大小和分布产生影响,而对其他应力分量的数值几乎没有影响,并且不改变应力分布规律。

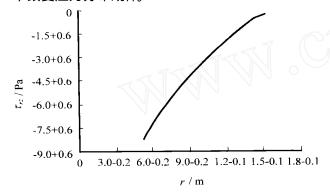


图 6 z=0 处  $\tau_z$  沿径向变化曲线

Fig 6 Distribution of shear stress along radius direction

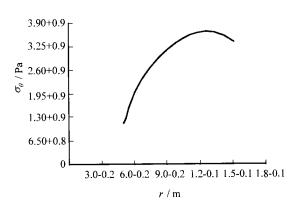


图 7 z= 200 mm 处 @ 沿径向变化曲线

Fig 7 Distribution of circumferential stress along radius direction

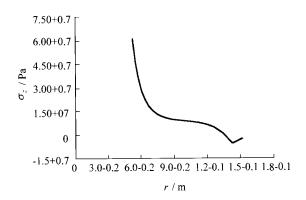


图 8 z= 200 mm 处 & 沿径向变化曲线

Fig. 8 Distribution of axial stress along radius direction

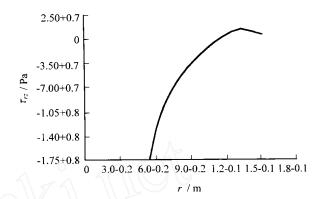


图 9 z= 200 mm 处 Tz 沿径向变化曲线

Fig 9 Distribution of shear stress along radius direction

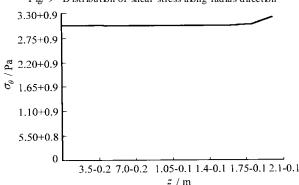


图 10 r= 100 mm 处 00 沿轴向变化曲线

Fig 10 Distribution of circum ferential stress along axial direction

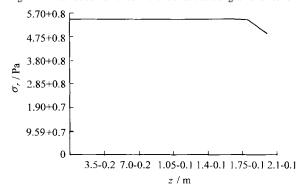


图 11 r= 100 mm 处 or 沿轴向变化曲线

Fig 11 Distribution of radial stress along axial direction

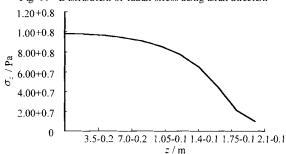


图 12 r=100 mm 处  $\sigma_c$  沿轴向变化曲线

Fig 12 Distribution of axial stress along axial direction

#### 2 讨 论

三维有限元分析得出飞轮的径向  $\sigma$  应力较大, 其主要由基体承受,而基体的强度较低,因此复合材料飞轮破坏的主要原因之一是由于径向应力较大, 导致基体开裂。针对飞轮轮缘材料的强度而言,关键问题之一是如何减小飞轮的径向应力  $\sigma$  和提高其径向强度。笔者仅介绍复合材料飞轮应力分析方法, 具体的复合材料飞轮设计,应以能量密度为目标函数,对结构进行优化设计。

#### 3 结 论

- (1) 无论飞轮匀速转动还是加速转动, 飞轮的应力场都非常复杂, 与简单的平面应力或平面应变状态有显著区别, 表明三维效应对飞轮的设计是不可忽视的。在没有解析解的情况下, 应采用三维实体单元进行有限元计算。
  - (2) 角加速度的存在主要影响  $\tau_z$ 的大小。
- (3) 力学分析和有限元计算表明, @ 基本上随 *r* 的增大而增大, 故轮缘材料采用先进的碳纤维缠绕.

以提高轮缘材料的强度,从而增加储能密度,表明这种设计是合理的。

(4) 由于没有考虑基体的收缩和纤维的预张力, 笔者计算的  $\sigma$  比实际情况要大, 因为基体收缩相当于轮缘和轮毂间过盈配合, 从而削弱实际飞轮中的  $\sigma$ , 因此计算的  $\sigma$  偏保守。

### 参考文献:

- Steven A shley. Designing safer flywheels [J]. M echanical Engir neering, 1996, 11: 88-91.
- [2] Sung HA, JEONG HM, CHOYS Optimum design of thick-walled composite rings for an energy storage system [J]. *Journal of Composite Materials*, 1998, 32(9): 851-873.
- [3] W LD P M. A nalysis of filament-wound cylindrical shells under combined centrifugal, pressure and axial bading [J]. Camposite, 1997, 28A: 47-55.
- [4] MURTHY D N S, SHERBOURNE A N. Elastic stresses in anisotropic disks of variable thickness [J]. Int J M ech Sci, 1970, 12: 627-640.