

文章编号: 1674-2869(2014)06-0059-05

# 碳纤维混合传动轴的弯扭承载及振动特性

王高平, 皮云晗, 郭 瑞

武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 43020

**摘 要:** 针对传统两段式钢制传动轴结构复杂、笨重且单段弯曲固有频率低的问题, 提出采用一段式碳纤维混合传动轴的解决方案. 传动轴外层为铝合金材料, 主要用传递扭矩; 中间层为玻璃纤维材料, 可用于消除碳纤维材料固化时产生的残余热应力; 内层为碳纤维复合材料, 利用其具有较高比刚度的特点, 提高轴的弯曲固有频率. 与传统二段式钢制传动轴相比, 该传动轴取消了中间万向节和支架, 从而简化结构, 整根轴的质量减少 40%. 实验与仿真结果显示一段式混合传动轴能满足至少  $2700 \text{ N} \cdot \text{m}$  的扭矩传递能力和高于  $154 \text{ Hz}$  弯曲固有频率的要求.

**关键词:** 混合传动轴; 弯曲固有频率; 弯扭; 振动特性; 碳纤维

**中图分类号:** U463.216+.2

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.06.014

## 0 引 言

近年来, 汽车的轻量化问题受到越来越多的关注. 根据相关研究, 在良好路况条件下, 普通乘用车的质量每减轻 15%, 燃油消耗率将下降 10%~13%, 减少尾气排放 7%. 通过汽车轻量化技术, 可以直接提高汽车的比功率, 使汽车的动力性能得到提高. 汽车轻量化对于降低油耗、减少尾气排放、提高燃油效率效果明显, 是目前汽车界的研究热点方向. 汽车轻量化主要有两种研究方向, 分别是材料轻量化与结构轻量化. 这两种方式通常结合起来使用, 制造出质量轻并且成本低的零部件. 传统的后驱车辆传动轴采用钢制材料, 以满足动力传递的要求; 两段式的结构在中间部位需要托架、万向节和支撑轴承的配合使用以满足传动轴弯曲固有频率至少为  $154 \text{ Hz}$  的要求<sup>[1]</sup>. 这种结构较复杂, 传动效率较低, 能源消耗大, 不符合当前的汽车轻量化发展趋势<sup>[2]</sup>. 虽然一段式铝制轴能满足扭矩传递的要求, 且重量较轻, 但其较低的弯曲固有频率无法满足车辆在高速行驶时的要求.

碳纤维复合材料减振能力较好, 将它应用到传动轴中, 能显著减小噪声和振动; 而且碳纤维复合材料具有高强度、高刚度等特性, 可提高传动轴的弯曲固有频率<sup>[2]</sup>. 因此, 将铝制轴和碳纤维材

料结合起来可制造符合使用要求的轻质一段式传动轴.

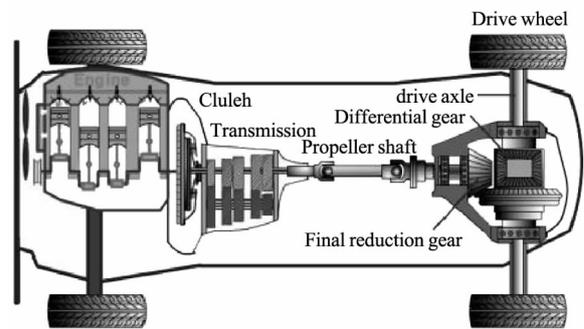


图 1 后轮驱动乘用车一段式传动轴<sup>[4]</sup>

Fig. 1 One-piece drive shaft for a rear wheel drive vehicle

在本研究中, 一段式混合传动轴由三种材料制成, 分别是铝合金、碳纤维环氧树脂材料和玻璃纤维环氧树脂材料. 通过共固化工艺将若干层碳纤维复合材料固化到铝制轴的内表面. 这种结构可以利用外层的铝轴传递大部分扭矩, 并利用碳纤维材料增加轴的弯曲固有频率. 本研究对一段式混合传动轴的铝轴部分进行弯扭承载能力分析, 对混合轴进行了模态仿真分析. 设计的铝轴基本尺寸为外径  $68 \text{ mm}$ , 壁厚  $2.5 \text{ mm}$ , 长度为  $1200 \text{ mm}$ , 应用的材料型号为碳纤维复合材料 URN300; 玻璃纤维复合材料 GEP215; 铝合金 A6061-T6. 涉及的材料属性如表 1 所示<sup>[2]</sup>.

收稿日期: 2014-05-08

基金项目: 留学回国人员科研启动基金(教外司留[2011]508号); 湖北省自然科学基金项目(2013CFB321)

作者简介: 王高平(1970-), 男, 湖北钟祥人, 副教授, 博士. 研究方向: 噪声、振动与汽车传动系统设计, 结构健康监测.

表 1 材料机械属性

Table 1 Mechanical properties of the materials

	材 料		
	URN300	GEP215	Al(6061-T6)
$E_1$ /GPa	380	35.5	—
$E_2, E_3$ /GPa	5.1	17.2	—
$G_{23}$ /GPa	5.4	3.5	—
$G_{12}, G_{13}$ /GPa	5.6	3.7	—
$\nu_{12}, \nu_{13}$	0.29	0.22	0.33
$\rho$ /( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1 550	2 050	2 700
$t_{\text{ply}}$ /mm	0.25	0.15	—
$E$ /GPa	—	—	72
$G$ /GPa	—	—	27

注:  $E_1$ : 轴向模量;  $E_2, E_3$ : 横向模量;  $G_{12}, G_{23}, G_{13}$ : 对应方向剪切模量;  $\nu_{12}, \nu_{13}$ : 对应方向的泊松比;  $\rho$ : 密度;  $t_{\text{ply}}$ : 复合材料的厚度;  $E$ : 弹性模量;  $G$ : 剪切模量。

## 1 铝制轴部分的弯扭承载实验研究

在复合材料传动轴中, 铝制轴部分将承担大部分的扭矩传递。因此, 对该部分进行力学分析, 保证轴具有足够的强度和弯曲刚度是后续设计的前提。本研究利用弯扭组合试验台和有限元分析软件, 从实验和仿真两个方面进行分析<sup>[3]</sup>。

### 1.1 力学理论基础

对于圆轴类零件的设计, 其强度设计和刚度设计的一般过程是根据轴传递的功率以及轴转速, 确定作用在轴上外加力偶的力偶矩, 应用截面法确定轴的横截面上的扭矩; 根据扭矩图确定可能的危险面以及危险面上的扭矩数值, 并计算危险截面上的最大剪应力或单位长度上的相对扭转角; 最后根据需要, 应用强度设计准则和刚度设计准则对圆轴进行强度与刚度校核<sup>[4]</sup>。

汽车传动轴管具有管径较大、壁薄、容易做到质量均匀分布、扭转强度高、弯曲刚度高等要求, 由于传动轴主要用于传递扭矩, 因此需要进行强度校核。强度设计准则要求将圆轴横截面上的最大剪应力限制在一定的数值以下, 即

$$\tau_{\max} = \frac{M_{x, \max}}{W_p} \leq [\tau] \quad (1)$$

式(1)中 $[\tau]$ 为许用剪应力。

### 1.2 铝轴的弯扭组合实验

通过弯扭组合实验, 可以用电测法测定平面应力下一点处, 主应力的方向和大小。实验装置如图 2 所示。实验所取的试样长度为 320 mm, 示意图如图 3。应变片的粘贴方向如图 4 所示。

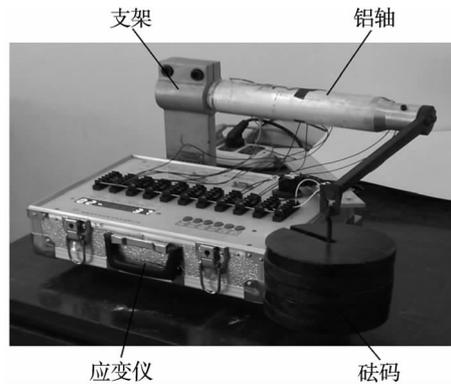


图 2 弯扭组合试验台

Fig. 2 Bending and torsion test equipment

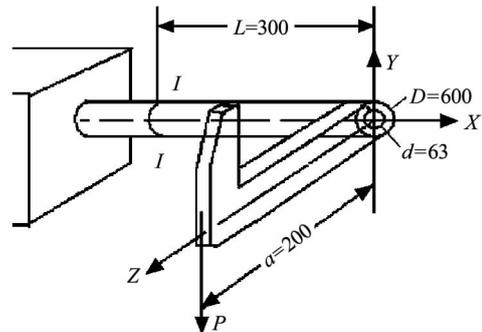


图 3 扭转实验示意图

Fig. 3 Torsion test schematic diagram

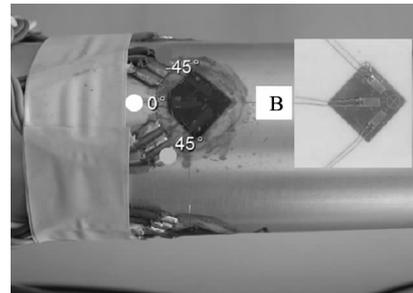


图 4 应变片的粘贴角度

Fig. 4 Bonding angle for strain gauge

实验用在力臂上加砝码的方式为铝轴提供扭矩, 每个砝码的重量为 2 kg, 最多可加 5 个砝码, 提供的扭矩从小到大依次为 5.88、11.76、17.64、23.52、29.4 ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )。根据单臂电桥的原理测量  $-45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$  三个方向的应变值, 其中  $-45^\circ$  和  $45^\circ$  的大小基本相等, 经过多次测量取平均值, 得到  $0^\circ$  和  $45^\circ$  两组应变仪读数。求 X、Y 方向的线应变和平面的切应变公式为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \epsilon_{0^\circ} \\ \epsilon_y = \epsilon_{-45^\circ} + \epsilon_{45^\circ} - \epsilon_{0^\circ} \\ \gamma_{xy} = \epsilon_{-45^\circ} - \epsilon_{45^\circ} \end{cases} \quad (2)$$

根据应变圆推导最大切应力公式为:

$$\gamma_{\max} = 2 \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可得:

$$\gamma_{\max} = \sqrt{(\epsilon_{45^\circ} + \epsilon_{-45^\circ} - \epsilon_{0^\circ})^2 + (\epsilon_{45^\circ} - \epsilon_{-45^\circ})^2} \quad (4)$$

而  $\epsilon_{45^\circ} = -\epsilon_{-45^\circ}$ , 即:

$$\gamma_{\max} = 2\sqrt{\epsilon_{0^\circ}^2 + \epsilon_{45^\circ}^2} \quad (5)$$

根据表 2 和表 3 的数据即可算出铝轴的最大剪切应变,如表 4 所示.

表 2 0°读数  
Table 2 0° readings

电桥方式	加载扭矩 /N·m	应变仪读数/ $\mu\epsilon$		平均值 / $\mu\epsilon$
		第 1 次	第 2 次	
单臂测量	5.88	6	7	6.5
	11.76	13	14	13.5
	17.64	19	20	19.5
	23.52	25	23	24
	29.4	30	31	30.5

表 3 45°读数  
Table 3 45° readings

电桥方式	加载扭矩 /N·m	应变仪读数/ $\mu\epsilon$		平均值 / $\mu\epsilon$
		第 1 次	第 2 次	
单臂测量	5.88	1	1	1
	11.76	4	5	4.5
	17.64	7	8	7.5
	23.52	10	11	10.5
	29.4	14	16	15

表 4 最大剪切应变

Fig. 4 The maximum shear elastic strain

加载扭矩 /N·m	5.88	11.76	17.64	23.52	29.4
$\gamma_{\max}(\text{m/m})$	$1.315\text{e}^{-5}$	$2.846\text{e}^{-5}$	$4.179\text{e}^{-5}$	$5.239\text{e}^{-5}$	$6.798\text{e}^{-5}$

### 1.3 数值仿真分析

利用 ANSYS Workbench 软件进行仿真分析. 对轴的一端施加固定约束, 另一端施加扭矩, 扭矩的数值与实验时施加的扭矩大小相等, 求解最大切应变的结果如图 5 所示, 不同扭矩下最大切应变结果如图 6 所示.

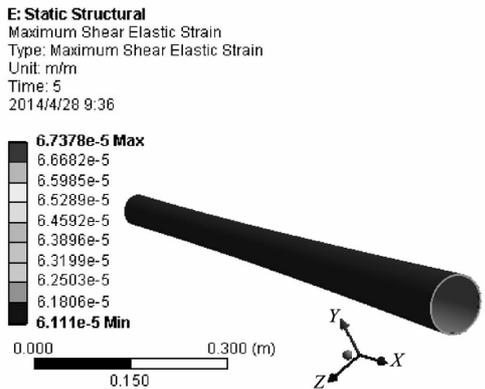


图 5 最大切应变

Fig. 5 Maximum shear elastic strain

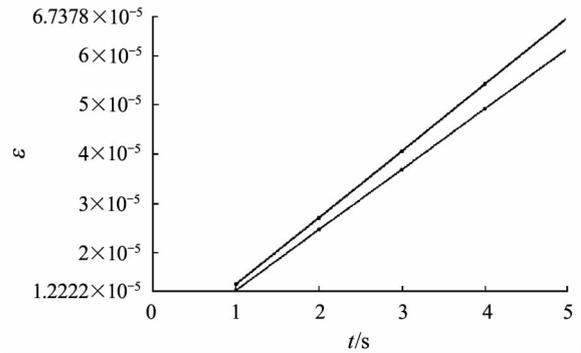


图 6 不同载荷下的最大切应变

Fig. 6 Maximum shear strain under different loading conditions

对比实验和仿真的数据可知, 两者误差在 0.2%~5.6%, 在可接受的范围内. 由于铝属于塑性材料, 在弹性形变范围内应变与受力呈线性关系, 查阅资料可知, 铝的许用剪应力为 205 MPa, 由公式(1)换算可知铝轴在承受 2 700 N·m 的扭矩时, 剪应力为 167.5 MPa, 所以铝制轴的强度满足设计要求.

## 2 混合轴的结构

混合轴的制备采用共固化工艺, 先将碳纤维贴到铝制轴内壁, 送入共固化炉加热. 如果碳纤维直接贴在铝制轴内表面, 在加工过程中, 两种材料的接触表面会产生残余热应力, 造成碳纤维层损伤. 因此, 将玻璃纤维材料植入到碳纤维与铝制轴内壁之间, 可最大程度上减小残余热应力<sup>[1]</sup>.

碳纤维材料的固化角度会对传动轴的静态扭矩和固有频率产生影响, 有研究表明, 固化角度为 45°时能传递的静态扭矩最大, 固化角度为 0°时能最大限度提升轴的弯曲固有频率<sup>[5]</sup>.

本研究主要是为了提高混合轴的弯曲固有频率, 所以碳纤维的铺设角度为 0°. 在实验中, 共分析 3 种型号的轴, 碳纤维层数分别为 1~3 层, 其他参数均一样. 混合传动轴的内部结构如图 7 所示: 外层为铝制轴, 中间层为玻璃纤维, 内层为碳纤维.

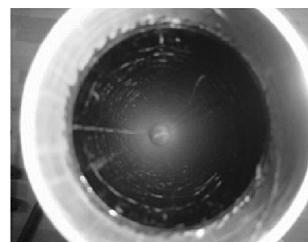


图 7 混合轴内部结构

Fig. 7 The internal structure of composite shaft

### 3 混合轴振动特性的分析

假定传动轴支承条件为两端固定<sup>[6]</sup>, 弯曲固有频率计算公式为

$$f(\text{Hz}) = \frac{(4.73)^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (6)$$

运用有限元软件 ANSYS14.5 进行模态分析, 结果如图 8 所示。图 8(a)、图 8(b)、图 8(c) 分别为传动轴含有 1、2、3 层碳纤维, 一阶弯曲固有频率分别为 316.25 Hz, 345.57 Hz, 367.68 Hz。

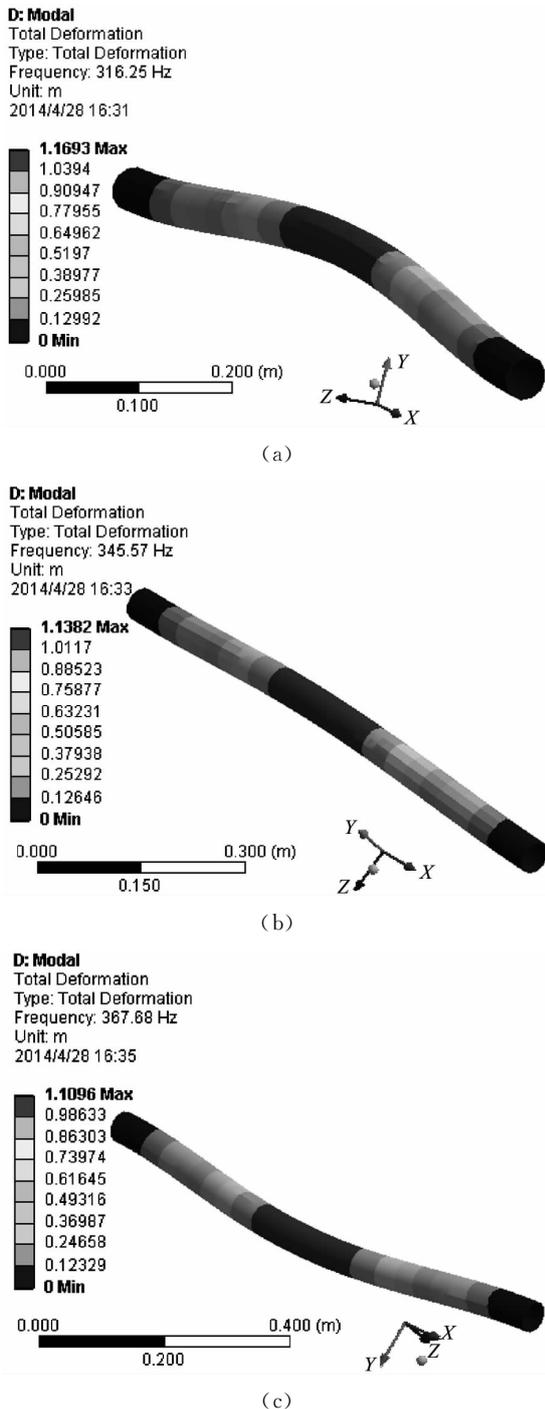


图 8 模态分析结果

Fig. 8 The results of modal analysis

### 4 结 语

模态分析结果显示, 当碳纤维复合材料固化到铝制轴的内表面后, 能显著提高其弯曲固有频率。本研究首先通过有限元分析及实验测试相结合的方法对铝轴的静力学性能进行了详细分析; 然后通过有限元分析对铝/碳纤维复合材料混合传动轴进行了模态分析<sup>[7]</sup>。仿真结果与预期结果基本一致: 当碳纤维层数增加时, 混合轴的一阶弯曲固有频率也随之增加。

后驱乘用车采用一段式碳纤维混合传动轴的设计, 引入轻质的复合材料配合使用铝合金, 该设计方案将使传动轴更轻, 振动特性更加符合汽车运行的要求。研究分析结果可以为混合轴的生产制备提供有效的依据。

### 致 谢

感谢留学回国人员科研启动基金(教外司留[2011]508号)和湖北省自然科学基金项目(2013CFB321)对本论文的资助。

### 参考文献:

- [1] 王高平, 胡凯, 陈绪兵, 等. 碳纤维层数变化对混合传动轴的振动特性影响研究[C]//科技引领产业、支撑跨越发展——第六届湖北科技论坛论文集. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2011: 8-10.
- [2] WANG Gao-ping, HU Kai, CHEN Xu-bin, et al. An research about effect of vibration characteristics for hybrid drive shaft with different number of carbon fiber layers[C]//Science and technology lead, support the development of industry—The sixth Hubei science and technology forum set. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2011: 8-10. (in Chinese)
- [3] KIM H S, LEE D G. Optimal design of the press fit joint for a hybrid aluminum/composite drive shaft [J]. Composite Structures, 2005(70): 33-47.
- [4] LEE D G. Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft[J]. Composite Structures, 2004(69): 87-99.
- [5] 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [6] FAN Qin-Shan, YIN Ya-jun. Mechanics of materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [7] LEE H J, HWANG J H, KIM S S. A study on the vibration characteristic of slip-in tube propeller-shaft in FR automobile[J]. KSNE, 2006, 2(5): 309-313.
- [8] KIM T W, LEE S K, JUN E J. Design and manufac-

- turing of composite drive shaft for automobiles[J]. KSAE,2006,1(3):109-117.
- [7] 吴和保,柯超,竺东杰,等.实时温度测控系统在材料浓缩提取技术上的应用[J].武汉工程大学学报,2014,36(1):63-68.

WU He-bao, KE Chao, ZHU Dong-jie. Temperature control system in material concentrated extraction technology of application[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2014,36(1):63-68. (in Chinese)

## Bending and torsion loading capability and vibration characteristics of carbon fiber hybrid drive shafts

WANG Gao-ping, PI Yun-han, GUO Rui

School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

**Abstract:** One-piece carbon fiber hybrid drive shaft for a rear wheel drive vehicle was proposed to solve the problem that traditional two-piece steel drive shaft has complex structure, heavy weight and low bending natural frequency for single shaft. This drive shaft outer layer was manufactured by aluminum alloy materials, and mainly used to transfer torque; the middle layer was made of the glass fiber materials to eliminate the thermal residual stress generated during the fiber materials being glued into the aluminum shaft; the inner layer was made of carbon fiber materials with high specific stiffness to improve the bending natural frequency of shaft. Compared with the traditional two-piece drive shaft, the hybrid drive shaft removed the middle universal joint and support structure. Therefore, the weight of the whole shaft is reduced by 40%. The result show that the one-piece carbon fiber hybrid drive shaft satisfies the needs of torque transmission capability of at least 2700 N·m and bending natural frequency of more than 154 Hz.

**Key words:** hybrid drive shaft; bending natural frequency; bending and torsion; vibration characteristics; carbon fiber

本文编辑:陈小平