

重型汽车传动轴的轻量化研究

张启伟¹, 李贞丽^{2*}, 范文林¹, 陶燕琳³, 蒋希赞¹

1. 成都航空职业技术学院 四川成都 610100
2. 芜湖伯特利汽车安全系统股份有限公司 安徽芜湖 241000
3. 四川华雅电机有限责任公司 四川成都 610100)

摘要: 为解决某重型汽车传动轴存在的过重导致能耗高和寿命短的问题, 选择传动轴轻量化设计中常用的几种材料, 并通过有限元和理论计算相结合的方式验证了模型的正确性, 最后使用有限元软件对不同材料传动轴的轴筒进行研究。研究表明, 铝合金和镁合金轴筒的重量相比于优化前分别降低了57.7%和71%; 碳纤维复合材料轴筒经结构和材料优化后相比于优化前降低了96%。

关键词: 传动轴; 有限元分析; 轻量化

DOI:10.16173/j.cnki.ame.2024.08.004

相关研究表明, 汽车的整備质量每减重10%, 燃油消耗量可降低6%~8%, 使用寿命增加50%^[1]。因此, 各大汽车厂商都将目光聚焦在了汽车轻量化设计, 希望以此提高自身的竞争力。传动轴可为汽车行驶提供动力, 其轻量化研究也逐渐被各厂商重视, 近年来大量学者对汽车传动轴的研究也较多。魏春梅等^[2]对重型汽车传动轴的结构进行了轻量化研究, 研究表明拓扑优化可以有效实现汽车传动轴的轻量化。曹培欢等^[3]针对汽车传动轴提出了碳纤维复合材料结构及性能一体化设计方法, 此方法相较之前减重了22.8%。王成明等^[4]对汽车传动轴进行了优化, 优化后的结构在运行中振幅减小了23.17%。张启伟等^[5]针对汽车传动轴设计了一种具有自润滑功能的万向节十字轴承, 该轴承可有效提高传动轴的使用寿命。徐华

福等^[6]对商用车传动轴中的端面齿法兰叉和焊接叉进行了结构轻量化和疲劳寿命优化。虽然各研究者对汽车传动轴的结构研究较多, 但是对传动轴的材料分析却很少, 因此有必要对不同材料的传动轴进行分析。

本文以某重型汽车传动轴的轴筒为研究对象, 采用有限元和理论计算相结合的方式对轴筒进行建模并进行静力学分析, 获得轴筒在不同材料下的最大剪切应力、最大变形和总质量, 最后针对不同材料的轴筒提出建议。

轻量化材料

在汽车工业持续追求轻量化以提升能效和性能的背景下, 汽车制造材料的选择发生了显著的变化, 如图1所示, 镁、铝合金及塑料等其他材料在汽车制造

基金资助: 成都航空职业技术学院自然科研项目“汽车传动轴优化设计与轻量化材料研究”(ZZX0623084); 成都航空职业技术学院自然科研项目“基于儒科夫斯基变换的液力变矩器泵轮叶片参数化集成”(ZZX0623082)。

*通讯作者: 李贞丽

中比例逐年上升^[7]。随着时间的推移，钢铁和铸铁在汽车材料中的占比逐年下降，以钢铁下降最为突出，而铝合金和塑料的占比却呈现上升趋势。虽然铝合金和塑料的占比越来越大，但并没有完全替代钢铁和铸铁，主要原因是成本问题。

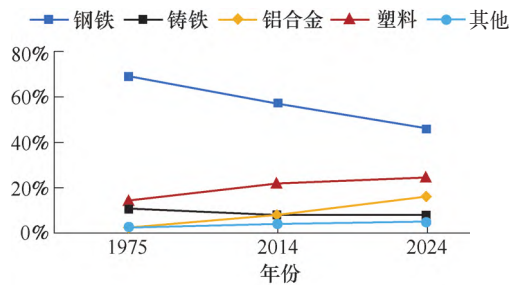


图1 汽车材料构成比例

在追求材料轻量化的过程中，还需要考虑成本与减重效果，以确保在实现轻量化目标的同时，不牺牲成本效益。常见的轻量化材料的相对成本及减重效果^[8]如图2所示。材料的相对成本越高，减重越明显。以铸铁为基准，当采用铝合金替代时，虽然能够减重55%，但是材料成本却增加至原来的2倍，镁合金的成本增加至之前的3倍，所以在进行材料轻量化同时成本和减重幅度都要考虑。

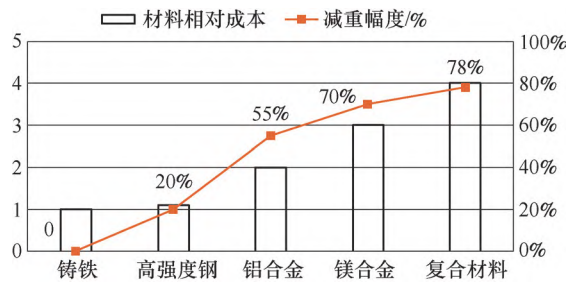


图2 轻量化材料相对成本及减重幅度

轴筒材料的选择及方案

零部件的设计是由功能、几何形状和材料三个因素决定的，它们可由以下函数表示

$$P=f(F,G,M)$$
 (1)

式中 P——设计；

F——功能；

G——几何形状；

M——材料。

为了使选择的材料最佳，那么P值应为最大或最

小值。将上述公式的功能F、几何形状G和材料M都看成自变量，则上述公式可进行如下变换

$$P=f_1(F)f_2(G)f_3(M)$$
 (2)

公式中f₃为材料因素，f₁和f₂的乘积为结构因素。由上述函数可知，3个因素都是独立存在的，可以在不考虑结构因素条件下，只对材料因素研究来获得最优材料。同时在选择最优材料时，不仅要考虑减重效果出发，还要考虑其结构刚度、强度和变形等因素。所以材料的密度ρ和弹性模量E就至关重要了，通常用比弹性模量来表示

$$M_1=E/\rho$$
 (3)

需要注意的是，此公式只是轻量化中选择材料的材料指数之一，特别适用于零件承受单轴和均匀分布的应力。经查询轻量化手册得知，主要承载弯曲应力的零部件应用如下公式

$$M_2=\frac{\sqrt{E}}{\rho}$$
 (4)

根据传动轴的工作状态可知，其主要承受单轴与弯曲应力。将碳纤维复合材料、铝合金、镁合金和钢的材料参数带入公式3和4中可得到它们的M₁和M₂值（见表1）。

表1 各材料的材料参数分析

材料	碳纤维 复合材料	铝合 金	镁合金	钢
弹性模量E/GPa	62	72	47	201
密度ρ / mg·m ⁻³	1.8	2.9	2.0	7.9
M ₁ =E/ρ / (Gpa·m ³ ·mg ⁻¹)	40	28	26	26
M ₂ = √E / ρ / (Gpa ^{0.5} ·m ³ ·mg ⁻¹)	4.9	3.2	3.8	1.8

从表1中可知，当传动轴主要承受拉应力时，铝、镁合金和钢的M₁值区别不大，但是当传动轴承受弯曲应力时，铝、镁合金的M₂值明显比钢高。四种材料中，碳纤维复合材料的M₁和M₂值都明显高于其他材料。

轴筒的轻量化设计

1. 材料参数的设定

结合企业的实际生产情况，本次轻量化的材料，选择镁、铝合金和碳纤维复合材料。其中碳纤维复合材料材料参数见2表。

表2 碳纤维复合材料的性能参数

材料	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	μ	$\rho/\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$
碳纤维复合材料	125	8.0	8.0	0.32	1.52

2. 轴筒强度分析

传动轴的轴筒与花键套和万向节相连，故其主要失效形式是由于扭矩过大导致其发生变形甚至断裂。其正常工作时，扭转强度应满足

$$\tau=16DT/\pi(D^4-d^4)\leq[\tau] \tag{5}$$

式中 $[\tau]$ ——许用剪切应力；

D ——轴筒外径；

d ——轴筒内径；

T ——扭矩。

此次选择传动轴的轴筒尺寸如下： $D=140\text{mm}$ ， $d=120\text{mm}$ ，扭矩 $T=2400\text{N}\cdot\text{m}$ ，计算得轴筒剪切应力 $[\tau]=96.8\text{MPa}$ 。材料选择的是40Cr，其许用切应力 $[\tau]=432\text{MPa}$ 。取安全系数为2.5，则 $\tau=96.8<[\tau]/2.5=172.8\text{MPa}$ 。由此可知40Cr轴筒在正常工作时中，其安全性较高。

3. 轴筒有限元分析

将轴筒模型导入有限元软件中进行分析，得到轴筒正常工作时的剪切应力云图和变形云图，如图3和图4所示。

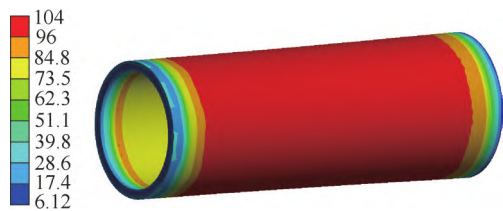


图3 轴筒剪切应力云图

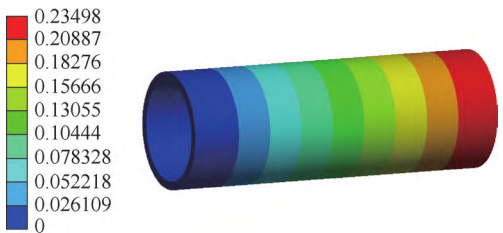


图4 轴筒变形云图

由图3可知，轴筒最大剪切应力出现在轴筒的表面为104MPa，与公式（5）理论计算值相差7%，符合实际工程误差。且轴筒的最大变形出现在与万向节叉连

接的位置且在材料允许范围内，表明了轴筒有限元模型正确。

4. 轴筒材料轻量化方案分析

本次材料轻量化选择的是工艺及技术方面都很成熟的材料，分别是铝合金、镁合金及碳纤维复合材料。由公式（5）可知，轴筒的剪切应力只与轴筒内外径和扭矩相关，与轴筒材料无关。但是不同材料的轴筒在工作中，其自身受到的应力和变形是不一样的，所以可以在其满足自身强度和变形的条件下进行减重，以此来获得最优材料。三种不同材料、相同结构尺寸的轴筒在工作状态下受到的最大剪切应力和最大变形，如图5所示。

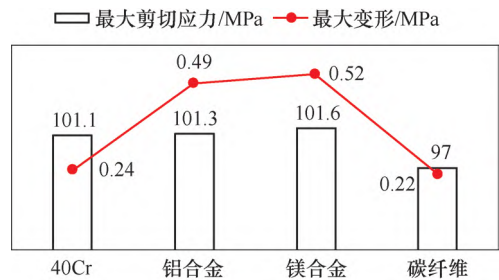


图5 不同材料轴筒的最大剪切应力及变形值

从图5可知，更换材料后的轴筒的剪切应力相差不大，与公式（5）相吻合。由于镁、铝合金的安全许用应力为120MPa，所以轴筒的结构尺寸不用改动。但由于复合材料的许用剪切应力为680MPa，而仿真计算所得值为97MPa，故碳纤维复合材料轴筒具有较大的减重空间。所以，本次轻量化的思路要从轴筒的结构尺寸方面进行优化。由于轴筒要与花键套和万向节相连，所以其连接配合尺寸不能改变，那么就只有对轴筒进行减薄，从而达到最大轻量化的目标。通过公式（5）可知，要减薄轴筒只能减小外径，经过大量的计算分析得到不同外径轴筒的剪切应力和变形如图6所示。

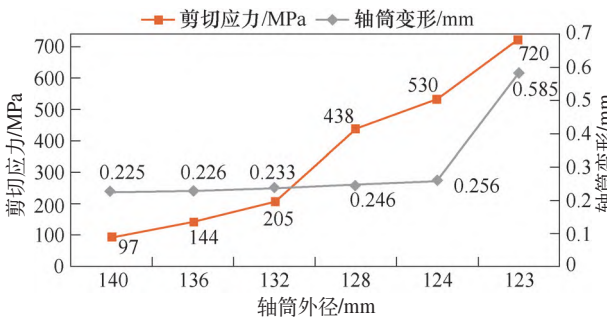


图6 不同外径轴筒的剪切应力及变形

由图6可知，随着轴筒外径不断减小，剪切应力逐渐增大，当外径为123mm时，剪切应力为720MPa，其值已经超过了复合材料的许用剪切应力，所以轴筒外径的最小值应取124mm，此时最大剪切应力为530MPa，最大变形为0.256mm，符合设计要求。

5. 轴筒材料轻量化方案对比

将不同材料轴筒在工作过程中受到的最大剪切应力、最大变形、总质量、减重效果和成本上升率整理得到数据见表3。

表3 各材料优化前后数据对比

	40Cr	铝合金	镁合金	碳纤维
最大剪切应力/MPa	101.1	101.3	101.8	530.2
最大变形/mm	0.24	0.49	0.52	0.22
总质量/kg	10.4	4.4	3.0	0.5
减重效果 (%)	——	58	71	95
成本上升率 (%)	——	110	154	248

从表3可知，铝合金、镁合金和碳纤维轴筒相对于40Cr轴筒质量分别下降了58%、71%和95%。但是由于铝合金、镁合金和碳纤维轴筒成本分别上升了110%、154%和248%，所以从减重效果和成本上升率来看，铝合金相较于镁合金和碳纤维轴筒来说更具性价比。

结语

通过对传动轴轴筒进行静力学分析，得到了其在工作过程中的最大剪切应力与最大变形。将得到的结果与理论计算值进行对比，验证了模型的正确性。接着将镁合金、铝合金和碳纤维复合材料赋予轴筒，得到不同材料轴筒的剪切应力与变形量。最后对碳纤维复合材料轴筒进行了尺寸优化并进行了轴筒材料轻量化方案的对比。通过对比，得出以下结论：

- 1) 传动轴轴筒在工作过程中的最大剪切应力为101MPa，最大变形为0.24mm。
- 2) 铝合金轴筒相对优化前的质量降低了58%。
- 3) 镁合金轴筒相对优化前的质量降低了71%。
- 4) 碳纤维复合材料轴筒相对于优化前的质量降低了95%。
- 5) 虽然碳纤维复合材料降重效果最好，但是由于其成本较高，建议使用在特殊要求的轿车；镁、铝合金的降重也很明显，特别是铝合金材料更有性价比，建议使用在中高端的汽车和重型汽车上。

参考文献：

[1] 依克热木 阿木提. 汽车轻量化技术的应用发展趋势[J]. 汽车与配件, 2018 (20) : 56-57.

[2] 魏春梅, 杨畅, 严学涛. 重载汽车传动轴的拓扑优化与轻量化设计[J]. 机械设计与制造, 2020 (11) : 289-292.

[3] 曹培欢, 彭梓尧, 岳晓丽, 等. 碳纤维复合材料汽车传动轴材料结构及性能一体化设计[J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2021, 47 (5) : 89-96.

[4] 王成明, 张得富, 陈云升. 汽车传动轴振动的仿真分析与优化[J]. 机械设计与制造, 2022 (9) : 27-31.

[5] 张启伟, 陶燕琳, 李兵. 汽车自润滑新型十字轴承设计及有限元分析[J]. 汽车工艺师, 2022 (9) : 10-14.

[6] 徐华福, 高旗, 牛杰. 商用车传动轴轻量化关键技术及应用[J]. 汽车零部件, 2023 (9) : 105-109.

[7] 卢春元, 房占鹏. 汽车传动轴轻量化设计研究[J]. 汽车测试报告, 2024 (3) : 19-21.

[8] 杨畅. 基于拓扑优化方法的汽车传动轴轻量化设计[D].湖北工业大学, 2019. **AUTO1950**

汽车工艺师 2024年 第8期 广告目次 **Advertisement Catalogue**

单位名称	查询编号	位置
汽车工艺师		封面
金粉商城	8000	封二
《汽车工艺师》杂志订阅	0001	封三
公益广告	8000	封底