

扭转精度对扭杆弹簧强扭工艺的影响

王振峰,董明明,赵凯,顾亮  
(北京理工大学机械与车辆学院,北京 100081)

**摘 要:** 为了研究扭杆弹簧扭转精度对其强扭过程的影响,利用弹塑性理论对扭杆弹簧强扭过程进行了理论探讨,获得扭杆弹簧在屈服与塑性强扭工况下的断面应力、扭矩及残余应力等变化的数学模型.应用 ABAQUS 有限元软件对不同型号、强扭工况的扭杆弹簧进行数值模拟,分析了扭转精度对扭杆弹簧强扭效果的影响.结果表明,在强扭工艺允许范围内,扭转误差对扭杆弹簧强扭效果影响不超过 5%.试验结果不仅验证了有限元模型的正确性,也得出扭杆弹簧强扭误差在不超过  $\pm 1^\circ$  工况下的强扭效果可近似等同的结论,此研究为扭杆弹簧强扭工艺的完善提供理论依据.

**关 键 词:** 扭杆弹簧;弹塑性;强扭工艺;数值模拟;强扭试验

中图分类号: U 463.3      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2016)10-1446-05

Effect of Torsion Precision on Torsion Bar Spring Pre-setting Process

WANG Zhen-feng , DONG Ming-ming , ZHAO Kai , GU Liang  
( School of Mechanical and Vehicle Engineering , Beijing Institute of Technology , Beijing 100081 , China.  
Corresponding author : GU Liang , E-mail : guliangbit@gmail.com )

**Abstract :** In order to study the effect of torsion precision on pre-setting process , the elastic-plastic theory was used to discuss the pre-setting process of torsion bar spring. Then , a mathematical model changing with stress , torque and residual stress was obtained under yield pre-setting and plasticity pre-setting situation. The ABAQUS software was used to simulate torsion bar spring with different models and pre-setting situations , and the effect of pre-setting precision on torsion bar spring was analyzed. The results showed that the effect of torsion bar spring pre-setting process in the range of torsion error on pre-setting is less than 5% . The test data not only validates correctness of the finite element model , but shows that torsion bar spring with no more than  $\pm 1^\circ$  pre-setting error can be seen approximately equivalent. The results provide a theoretical reference for improving the process of torsion bar spring pre-setting.

**Key words :** torsion bar spring ; elastic-plastic ; pre-setting process ; numerical simulation ; pre-setting test

扭杆悬挂作为履带车辆的缓冲和储能元件,具有结构可靠、质量轻、空间小、装配维修方便等特点而得到了普遍关注.同时,扭杆弹簧作为扭杆悬挂系统的关键部件之一,具有支撑车体、传递车体与地面作用力、缓和车轮冲击力及保证车辆行驶平稳性和乘员舒适性等作用.因此扭杆弹簧工作时,所承受的许用剪应力越大越易设计出负重轮与车体间较少刚性碰撞的悬挂装置<sup>[1-3]</sup>.

由于扭杆弹簧强扭工艺的特殊性,强扭过大或者不足都会降低扭杆弹簧的力学性能,而在具体试验前强扭量往往不可预知,需要进行大量的试验验证,造成强扭试验周期过长及成本较高的问题<sup>[2]</sup>.

针对这一问题,本文采用弹塑性理论分析了扭杆弹簧强扭过程中材料非线性的应力应变情况,结合有限元分析方法数值模拟了不同型号扭

杆弹簧在不同强扭工艺要求下的残余变形情况；通过与试验结果对比，得出强扭精度对扭杆弹簧的影响及扭杆弹簧强扭工艺的合理性，为扭杆弹簧强扭工艺的发展提供了参考。

# 1 扭杆弹簧强扭理论

## 1.1 扭杆弹簧强扭原理

扭杆弹簧强扭工艺工作简图如图 1 所示。其中，扭杆弹簧的直径为  $d$ ，长度为  $L$ ；且一端固定一端施加转矩  $M$ ，其产生相对转动的转角为  $\varphi$ ；如果在整个断面上没有产生塑性变形，则沿半径的应力遵循虎克定律<sup>[3]</sup>。

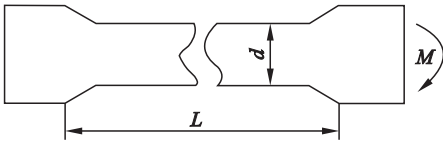


图 1 扭杆弹簧及其工作示意图

Fig. 1 Schematic of torsion bar spring and force condition

1) 当加载转矩  $M$  未超过材料的屈服极限转矩  $M_s$  时，有

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= r\varphi/L, \\ \tau &= G\gamma, \\ M &= \int_0^{\frac{d}{2}} \tau (2\pi r^2) dr = \frac{G\varphi}{L} \int_0^{\frac{d}{2}} 2\pi r^3 dr = \frac{2\tau J}{d}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中： $J$  为极惯矩 ( $\text{m}^4$ )； $G$  为材料的切变弹性系数 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )。

2) 当加载转矩  $M$  超过  $M_s$  时，扭杆弹簧某一半径以外的轴表层，材料剪切应变超过屈服极限应变，但此时剪切应变随扭杆弹簧截面半径的线性变化关系仍可假定不变<sup>[3-6]</sup>。如图 2 所示，扭杆未超过屈服极限卸载工况时，应力沿  $SO$  直线变化，在剪切应变  $\gamma_s \leq \gamma \leq \gamma_d$  区域，剪应力并不沿着原来的  $ASO$  曲线下降，而是沿着与  $SO$  平行的直线族  $AB, A'B' \dots$  下降。

3) 完全卸载时，扭杆弹簧芯部保持了原加载方向相同的残余应力，其数值可根据完全卸载时扭杆弹簧内外力矩平衡条件求得。

## 1.2 扭杆弹簧屈服强扭断面应力与扭矩、残余应力分析

由于扭杆弹簧并非理想弹塑性材料，故在屈服阶段变形过程中表面会出现硬化现象<sup>[3]</sup>。文献 [3-6] 提出扭杆弹簧屈服与塑性硬化过程中，断面半径方向的切应力与屈服极限  $\tau_s$  存在近似线

性关系；同时，硬化变形区的应力变化为

$$\tau = \begin{cases} \frac{r}{\rho_0} \tau_s & 0 \leq r \leq \rho_0; \\ \tau_s & \rho_0 \leq r \leq \rho_1; \\ \tau_s + k(r - \rho_1) \tau_s & \rho_1 \leq r \leq R. \end{cases} \quad (2)$$

其中： $\rho_1$  为屈服变形与硬化变形的分界值 ( $\text{m}$ )； $k$  为材料扭转硬化系数，与材料的性能有关。

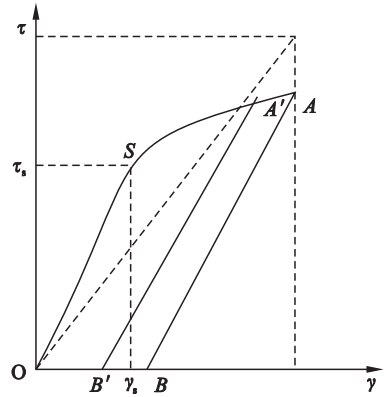


图 2 扭杆弹簧强扭示意图

Fig. 2 Schematic of torsion bar spring pre-setting

由此可知，屈服强扭的扭矩是断面上三个部分<sup>[4]</sup>（弹性变形区、塑性流动区和硬化变形区）应力作用的扭矩总和，以  $M'$  表示：

$$M' = 2\pi\tau_s \left( \int_0^{\rho_0} \frac{r}{\rho_0} r^2 dr + \int_{\rho_0}^{\rho_1} r^2 dr + \int_{\rho_1}^R k(r - \rho_1) r^2 dr \right). \quad (3)$$

## 1.3 扭杆弹簧塑性强扭断面应力与扭矩、残余应力分析

因扭杆弹簧材料的非线性，故强扭卸载后弹性区域恢复，但塑性区域保留且产生相应残余应力<sup>[4-6]</sup>。若变形过程中半径为  $r$  的某点应力为  $\tau$ ，则卸载时按弹性区域计算此点的应力  $\tau_e$ ，有

$$\tau_e = \frac{M'}{I} r = \frac{4}{3} \frac{r}{R} \tau_s \left[ 1 - \frac{1}{4} \left( \frac{\rho_0}{R} \right)^3 \right] + \frac{1}{3} k r \tau_s \left( 3 - 4 \frac{\rho_1}{R} + \left( \frac{\rho_1}{R} \right)^4 \right). \quad (4)$$

且断面内的残余应力  $\tau_r$  为

$$\tau_r = \tau - \tau_e. \quad (5)$$

将式 (4) 与式 (2) 代入式 (5) 可得不同变形状态下断面不同位置的残余应力，具体如式 (6) ~ 式 (8)。

1) 弹性变形区 ( $0 \leq r \leq \rho_0$ ) 的残余应力为

$$\tau_{re} = \frac{r}{\rho_0} \tau_s - \tau_e = \tau_s \left[ \frac{r}{\rho_0} - \frac{4}{3} \frac{r}{R} \left( 1 - \frac{1}{4} \left( \frac{\rho_0}{R} \right)^3 \right) - \frac{1}{3} k \left( 3 - 4 \frac{\rho_1}{R} + \left( \frac{\rho_1}{R} \right)^4 \right) \right]. \quad (6)$$

2) 屈服变形区 ( $\rho_0 \leq r \leq \rho_1$ ) 的残余应力为

$$\tau_{rs} = \tau_s - \tau_e = \tau_s \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{r}{R} \left( 1 - \frac{1}{4} \frac{\rho_0}{R} \right)^3 - \frac{1}{3} k \left( 3 - 4 \frac{\rho_1}{R} + \left( \frac{\rho_1}{R} \right)^4 \right) \right]. \quad (7)$$

3) 硬化变形区( $\rho_1 \leq r \leq R$ )的残余应力为

$$\tau_{rr} = \tau_s + k(r - \rho_1) \tau_s = \tau_s \left[ 1 + k(r - \rho_1) - \frac{4}{3} \frac{r}{R} \left( 1 - \frac{1}{4} \frac{\rho_0}{R} \right)^3 - \frac{1}{3} k \left( 3 - 4 \frac{\rho_1}{R} + \left( \frac{\rho_1}{R} \right)^4 \right) \right]. \quad (8)$$

以上残余应力对轴心产生力矩,若假设其合力矩为  $M_r$ ,有

$$M_r = M_{re} + M_{rs} + M_{rr} = 2\pi \left( \int_0^{\rho_0} \tau_{re} r^2 dr + \int_{\rho_0}^{\rho_1} \tau_{rs} r^2 dr + \int_{\rho_1}^R \tau_{rr} r^2 dr \right). \quad (9)$$

其中  $M_{re}$ 、 $M_{rs}$ 、 $M_{rr}$  为弹性变形区、屈服变形区和硬化变形区的残余应力矩。

因强扭卸荷后扭杆弹簧处于平衡状态,此时扭杆弹簧内力矩也应处于平衡状态,即将式(6)~式(8)代入式(9)中可得  $M_r = 0$ 。

同时,扭杆弹簧在卸载后,其横断面的残余应力在靠近表层为压应力,而靠近中心为正应力,其断面必有一层残余应力为零,从而使扭杆弹簧横断面上的切应力变成如图 3 所示的  $a-b-e-o$  分布,这样充分地发挥了断面内部材料的性能,提高了扭杆弹簧的承载能力<sup>[3,7-8]</sup>。

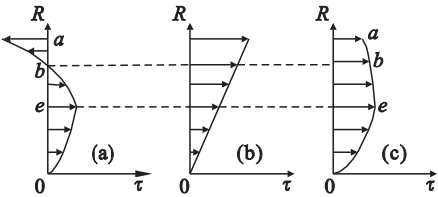


图 3 扭杆弹簧不同阶段断面的应力分布

Fig. 3 Stress distribution at different stages of torsion bar spring section

(a)—强扭卸载后;(b)—加载应力;  
(c)—加载后的合成应力。

## 2 扭杆弹簧有限元分析

### 2.1 扭杆弹簧参数

材料选用 45CrNiMoVA,且通过查阅机械设计手册可以得到低温回火处理后扭杆弹簧材料 45CrNiMoVA 的属性如表 1 所示<sup>[3,6]</sup>。

根据表 1 参数可以计算出 45CrNiMoVA 弹性系数  $E = 19.8 \text{ GPa}$ 。

本文应用不同型号扭杆弹簧进行强扭工艺加载,具体参数如表 2 所示。

表 1 45CrNiMoVA 材料参数

Table 1 Material parameters of 45CrNiMoVA

$\sigma_b$ MPa	$\sigma_s$ MPa	密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	剪切弹性系数 GPa	泊松比	屈服剪切应变 rad
1 470	1 350	7.8	76	0.3	0.015 5

表 2 不同型号扭杆弹簧

Table 2 Different models of torsion bar springs

序号	直径 mm	长度 mm	花键 mm	扭转次数	扭转角度 ( $^\circ$ )	扭转后扭杆弹簧的永久变形不得大于 ( $^\circ$ )
1	48	1 980	59	6	$103 \pm 1$	35
2	50	1 980	59	6	$106 \pm 1$	35
3	54	1 980	59	6	$98 \pm 1$	34
4	56	1 980	59	6	$96 \pm 1$	30

### 2.2 扭杆弹簧几何模型

扭杆弹簧在履带车辆上装配的三维模型如图 4 所示。由于仿真的要求,需要对模型进行简化处理和几何清理以便于网格划分等<sup>[8-10]</sup>,故可得扭杆弹簧的几何模型如图 5、图 6 所示。

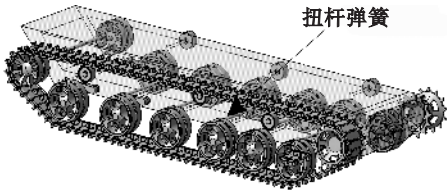


图 4 履带车辆三维模型示意图

Fig. 4 Schematic of tracked vehicles three-dimensional model



图 5 扭杆弹簧实体三维几何模型示意图

Fig. 5 Schematic of torsion bar spring three-dimensional solid geometry

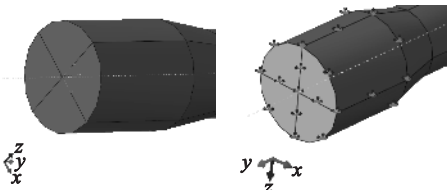


图 6 扭杆弹簧模型加载与约束情况

Fig. 6 Model of loaded and restrained torsion bar spring

### 2.3 扭杆弹簧模型网格划分

本文应用 ABAQUS 分析软件中的八节点六面体单元 C3D8I,因为该单元在分析各向同性率相关和速率无关的大塑性变形问题中,可以较好地避免剪切自锁的现象。

考虑实际情况 ,此次采用 8 mm 单元尺寸共划分单元网格总数为 11 924 个 ,节点总数为 12 980 个 ,划分网格后的扭杆弹簧有限元模型如图 7 所示.



图 7 扭杆弹簧二维有限元网格划分示意图  
Fig. 7 Schematic of two dimensions finite element meshing for torsion bar spring

### 3 扭杆弹簧强扭数值模拟分析

#### 3.1 扭杆弹簧强扭原理

在 ABAQUS 分析程序中提供了多种塑性材料选项 ,其中在分析材料非线性时 ,双线性随动强化模型最为常用. 所以 ,在扭杆弹簧强化处理的数值模拟中 ,采用上述双线性模型较宜<sup>[ 3 6 ]</sup>.

#### 3.2 数值模拟结果

在 ABAQUS 分析程序中设置边界条件 ,依据表 2 扭杆弹簧工艺参数进行数值模拟 ;此处以表 2 的序号 1 为例进行说明.

当加载到扭转角度大于 103°时 ,扭杆弹簧的外表层与内层进入屈服状态 ;通过数值模拟可得扭杆弹簧即其断面剪切应力分布如图 8 所示.

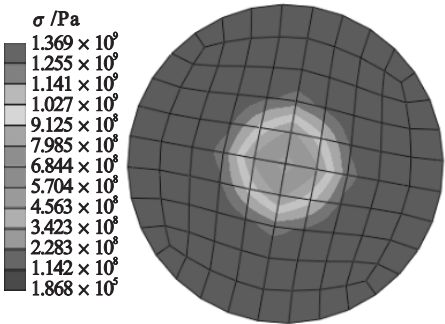


图 8 扭杆弹簧横截面处的应力分布图  
Fig. 8 Stress distribution of torsion bar spring cross section

从图 8 仿真结果得出 ,扭杆弹簧工作部分在最大扭转角处其表面及一定内部区域应力值为 1. 369 GPa ,大于屈服应力 1. 350 GPa 而发生屈服 ,但因未大于其强度极限 1. 470 GPa 而不发生断裂 ;通过以上的仿真可以得出扭杆弹簧在此工况下所达到的屈服深度. 扭杆弹簧强扭后的残余应力分布如图 9 所示.

当经过 6 次反复强扭完成后及卸载完全时 ,扭杆弹簧整体塑性应变状态 ,以及其表面和一定深度处产生塑性变形如图 10 所示.

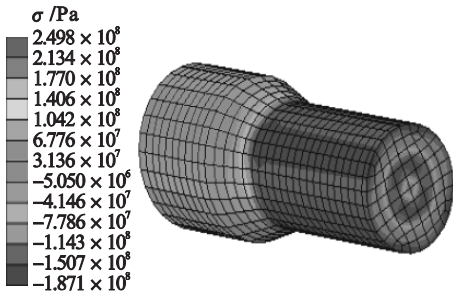


图 9 扭杆弹簧强扭卸载后的应力状态  
Fig. 9 Unload stress distribution of torsion bar spring pre-setting

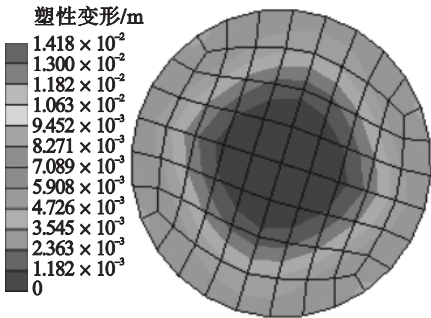


图 10 扭杆弹簧强扭 6 次结束后横截面塑性变形分布图  
Fig. 10 Plastic deformation distribution of cross section after six times torsion bar spring pre-setting

根据以上 ABAQUS 仿真分析的强扭后塑性变形情况 ,可知型号 1 样件在 6 次强扭结束工况下 ,沿半径方向塑性变形( PEEQ )值为正且具有逐渐增大的趋势 ,说明表面发生了塑性变形.

利用以上方法 ,当扭转误差在 ± 1°变化时 ,其具体的数值分析情况如表 3 所示.

表 3 扭杆弹簧强扭仿真数据  
Table 3 Simulation data of torsion bar spring pre-setting

序号	直径 mm	长度 mm	扭转 角度 (°)	仿真参数最 终塑性变形 角/(°)	备注 (加载工况)
1	48	1 980	102	34. 28	- 1°加载
			103	34. 66	正常加载
			104	35. 06	+ 1°加载

利用相同方法 ,可以得到其他型号扭杆弹簧的模拟数据.

### 4 扭杆弹簧强扭试验

#### 4. 1 试验仪器

扭杆试验主要应用扭杆弹簧预扭机进行 ,且  
( 下转第 1454 页 )