

83-87  
16

# 分阶式双渐开线齿轮 弯曲应力的光弹性试验

TH132.413  
0348.1

许洪斌 张光辉 钱振明

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 400044; 第一作者 31 岁, 男, 博士生)

**摘要** 做出斜齿分阶式双渐开线齿轮的硅橡胶模型和环氧树脂试件, 设计制造加载装置, 应用冻结切片三维光弹性试验法首次对该齿轮的弯曲应力进行了试验研究和应力分析, 与理论分析结果比较, 光弹性测试的应力小 10.6%。

**关键词** 渐开线; 齿轮; 光弹性实验

中国图书资料分类法分类号 O348.1

弯曲应力

## 0 引言

分阶式双渐开线齿轮是一种新型齿轮<sup>[1,2]</sup>, 它的优点之一是弯曲强度提高了, 作者对其弯曲应力进行了系统的研究, 提出了初步计算公式。为了证明所提出公式的可行性, 笔者设计、制造了齿轮及加载装置, 做出三维硅橡胶齿模和环氧树脂齿轮, 采用冻结切片法, 应用三维光弹性试验对该齿轮的真实受载应力进行研究。

## 1 弯曲应力的三维光弹性试验

光弹性法的实质是利用光弹性材料在载荷作用下产生的暂时双折射效应, 通过光弹性仪测定光程差的大小。当受力模型中的主应力差造成的光程差为波长的整数倍时, 发生消光现象, 出现一系列对应于不同  $N$  值的黑色干涉条纹, 不同条纹的点有不同的主应力差。因此, 等差线表示模型内部主应力差相等点的轨迹。

三维光弹性试验最常见的方法是冻结切片法<sup>[3]</sup>, 它是将受力模型温升到材料的冻结温度, 恒温一定时间后加载, 再缓慢降至室温, 然后卸去载荷。这样, 模型承受载荷时产生的双折射现象就永久地保存下来。用机械方法将模型切片薄片, 光学效应仍不会消失, 该特性称为应力冻结效应。

用滚刀切出一个该新型齿轮, 为了保证模型的精确性, 在齿宽方向每边留有 2~3 mm 的加工余量。用有机玻璃(厚 5 mm)制作一个正方形模型框, 将齿轮放入框正中, 在长、宽、高方向分别留有 30 mm 空间, 以保证硅橡胶模具有足够的刚度, 避免变形影响模型形状。

• 收文日期 1997-10-24

国家自然科学基金资助项目(编号:59775013)

表1 试件的尺寸

$m_s$ (mm)	$\alpha$ (°)	$\beta$ (°)	$z$	$y$	$l^*$	$d$ (mm)	$B$ (mm)
6	20	10	18	0.08	0.15	109.67	30

在硅橡胶液中加入2%的交联剂正硅酸乙酯,均匀搅拌,在真空泵内抽去气泡后迅速沿模型框一角缓缓倒入,到上表面成平面后,再置入真空泵中抽去气泡,在空气中冷却48h至凝固。将金属齿轮小心取出,得到硅橡胶齿轮模具见图1。把液体环氧树脂和30%固化剂顺丁烯二酸酐倒入烧杯,加热至60℃后,均匀搅拌,用带有软管的小漏斗将环氧树脂缓缓倒入图1的硅橡胶模具中,置入真空泵中抽去气泡后,再置于烤箱内固化,固化温度曲线如图2。经62h固化后,小心取出模型,以齿轮模型坯中心孔定位,去掉两端面余量,得到所需环氧树脂试件。把环氧树脂试件安装在设计的加载装置上(图4)。在图4中,试件齿轮9通过压盖3、6把试件轴7锁紧,在加载杠杆4上加砝码,扭矩通过加载齿轮10传递给试件9齿面。检查齿面接触状况,调整好啮合位置后,锁紧试件轴,在杠杆上施加适当的力矩,与加载圆盘试件一起放入烤箱,按图3所示温度曲线冻结,22h后降至室温卸载。取出冻结后的齿轮,将其铣削成厚5mm的齿轮片。

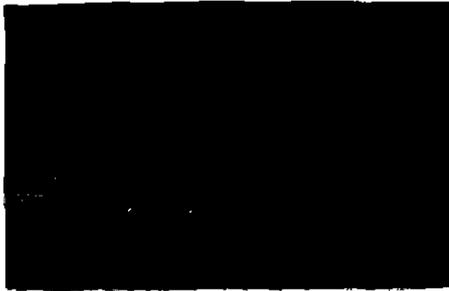


图1 硅橡胶模具图

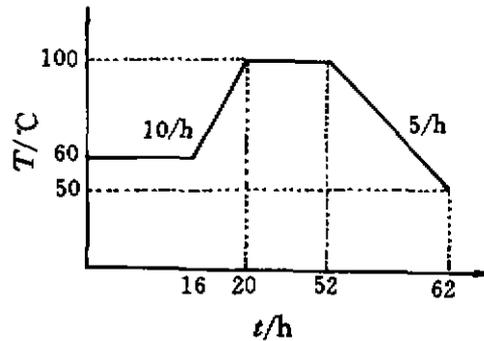


图2 固化曲线

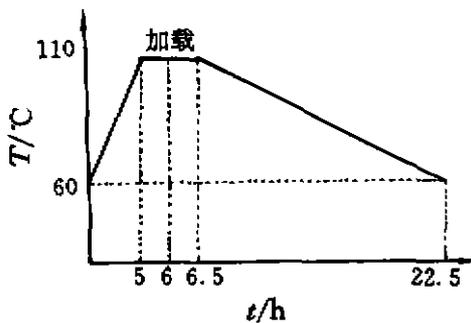


图3 冻结温度曲线

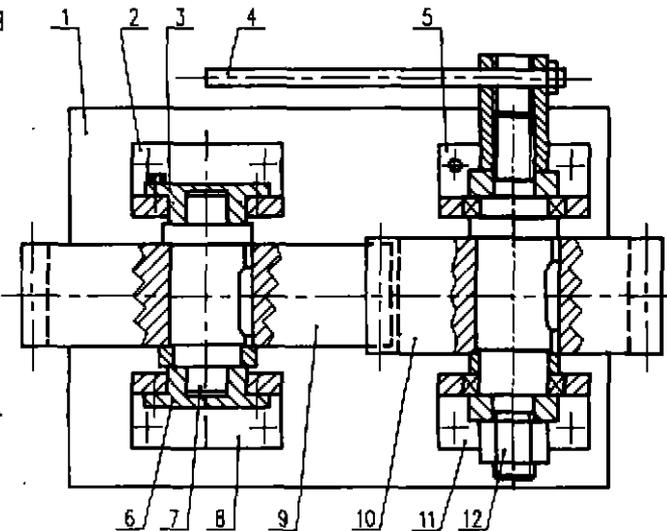


图4 实验加载装置

## 2 光弹试验的应力分析

从圆盘光弹性实验的等差线图上,测得圆心处的条纹级数  $N$ ,则材料条纹值  $f$  为:

$$f = \frac{8P}{\pi d N} \quad (1)$$

式中  $d$ ——圆盘直径; $P$ ——载荷; $N$ ——条纹级数

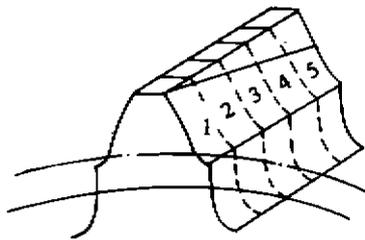
材料条纹值  $f$  精确与否,直接影响光弹性实验的精确度。考虑材料变形后的蠕变和温度对  $f$  值的影响,本文实验测定  $f$  值是通过相同材料制作的圆盘与上述加载装置一起进行冻结,数出冻结后圆盘上的条纹数计算获得的。

本试验中, $P = 24.3 \text{ N}$ , $d = 0.048 \text{ m}$ , $N = 6.6$ ,则材料条纹值  $f = 0.195 \text{ (kN/m 级)}$ 。

齿轮片的实测条纹数和等差线分别见表 2 和图 5。

表 2 齿轮片的实测条纹数

位置	载荷作用在齿顶部(左齿)		载荷作用在齿顶部(右齿)	
	接触点处条纹数	齿根应力条纹数	接触点处条纹数	齿根应力条纹数
齿轮 1	5.0	2.3	7.5	1.0
齿轮 2	5.8	3.4	11.0	0.7
齿轮 3	7.0	3.8	5.0	1.5
齿轮 4	10.0	3.6		
齿轮 5	9.0	3.0		



(a) 齿轮切片顺序



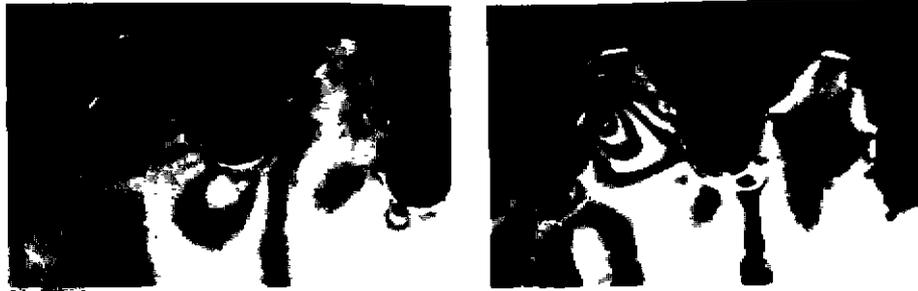
(b) 齿轮片 1 应力等差线



(c) 齿轮片 2 应力等差线



(d) 齿轮片 3 应力等差线



(e) 齿轮片 4 应力等差线

(f) 齿轮片 5 应力等差线

图 5 齿轮片的应力等差线

在试件齿轮上施加扭矩  $0.675 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 则齿轮分度圆(直径为  $d$ ) 上的名义圆周力:

$$F_t = 2T/d = 12.3 \text{ N}$$

光弹性测试的齿根应力结果见下表 3, 由于测量值为次主应力, 且  $\sigma_2 = 0$ , 表中的应力根据下式确定, 即:

$$\sigma_1 = Nf/h \quad (2)$$

式中  $\sigma_1$ ——次主应力;  $f$ ——材料条纹值;  $h$ ——模型厚度

表 3 光弹性测试的齿根应力

	齿片厚 (mm)	载荷作用在齿顶部(左齿)		载荷作用在齿顶部(右齿)	
		齿根应力条纹数	齿根应力(MPa)	齿根应力条纹数	齿根应力(MPa)
齿轮片 1	4.82	2.3	0.093	1.0	0.040
齿轮片 2	5.00	3.4	0.133	0.7	0.027
齿轮片 3	5.20	3.8	0.143	1.5	0.056
齿轮片 4	5.20	3.6	0.135		
齿轮片 5	4.80	3.0	0.122		

### 3 光弹性试验的结论

1) 接触线上的载荷分配是不均匀的。齿顶啮合时, 啮入端载荷大于啮出端载荷, 而齿根啮合时, 啮合端载荷大于啮入端载荷。

2) 试验结果分析。

由光弹性试验结果知道齿根最大应力  $\sigma_{e1} = 0.143 \text{ MPa}$ 。

笔者从理论上研究分阶式双渐开线齿轮的弯曲应力后提出如下计算公式<sup>[4]</sup>:

$$\sigma_{Rad} = \sigma_{FP} \cdot Y_\beta \cdot Y_C \quad (3)$$

式中  $Y_\beta$ ——螺旋角系数;  $Y_C$ ——接触线系数。

根据上式, 计算结果如下:

表 4 与有限元分析结果的比较

平均线载荷 $F_N/B(\text{N/m})$	$\sigma_{FP}(\text{MPa})$	$Y_\beta$	$Y_C$	$\sigma_{Rad}(\text{MPa})$
436	0.264	0.98	0.62	0.16

令  $\delta$  表示试验与计算结果的相对误差:

$$\delta = \frac{\sigma_{e1} - \sigma_{Fm1}}{\sigma_{e1}} \% = -10.6\%$$

上述分析可知,提出的计算公式比光弹性试验结果大 10.6%,基本可以论证所提出公式的可行性。作者认为,偏差的产生主要有两个原因:a)有限元计算模型基于接触线的载荷模型是均匀分布;b)轮齿边界条件为固定约束,实际的光弹性试验与之不完全相符。

### 参 考 文 献

- 1 张光辉,许洪斌,龙董. 分阶式双渐开线齿轮. 机械工程学报,1995,31(6),47~52
- 2 Xu Hongbin. Influences of Ladder-shape Factors on Strength and Stiffness of Double Involute Gear. in, Proceedings of International Conference on Mechanical Transmissions and Mechanisms (MTM). Tianjin, PRC, 1997. 506~509
- 3 天津大学材料力学教研室光弹组. 光弹性原理及测试技术. 北京,科学出版社,1980. 1
- 4 许洪斌. 分阶式双渐开线齿轮弯曲强度的研究.[学位论文]. 重庆,重庆大学机械传动国家重点实验室, 1997

## Photoelastic Experimental Investigation on Bending Stress of Double Involute Gear with Ladder-shaped Teeth

*Xu Hongbin      Zhang Guanghui      Qian Zhenming*

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University)

**ABSTRACT** After preparing a silicon rubber gear model, the corresponding epoxy resin test sample of a double involute gear with ladder-shaped teeth and the clamping apparatus, bending stresses of the teeth based on three dimensional photoelastic experiment are analyzed by freezing slice method for the first time. Comparison between the experiment and the theoretical calculation is made. The result shows that the stress value of the photoelastic experiment is about 10.6% less.

**KEYWORDS** involute; gear; photoelastic experiment