

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.041

平面二次包络环面蜗杆副光弹性实验*

张彦钦 张光辉

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400030)

【摘要】 通过改变固化剂的含量,配制了几种光弹性模型材料。在冻结温度下,应用 YE2538 型程控静态电阻应变仪测试了不同材料的弹性模量。参考钢-铜副的弹性模量比值,合理配置了蜗杆和蜗轮的光弹性模型材料。制备了钢质轴芯镶铸环氧树脂齿部的蜗杆模型,整体浇注了环氧树脂蜗轮模型。将光弹性模型副装配在减速箱中,通过扭力杆施加载荷,在烘箱内完成了应力冻结过程。应用 409-I 型光弹仪观测了蜗轮模型切片等差线的分布状态。对比分析了光弹性实验结果和有限元分析结果。结果表明:同一切片上,各齿最大等差线级数的差值小,齿间载荷分配比较均匀;沿齿高方向,齿根和齿顶处的等差线级数较分度圆附近大;光弹结果与有限元计算结果的一致性较好,验证了该蜗杆副光弹性实验的可靠性。

关键词: 蜗杆 光弹性法 有限元 仿真 实验

中图分类号: TH132.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)11-0208-04

Photoelastic Study on Planar Double Enveloping Hourglass Worm Gears

Zhang Yanqin Zhang Guanghui

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract

Several photoelastic materials with different ingredient proportions of firming agent were made up. Freezing elastic ratios of materials were measured by the YE2538 programmable static strain gage. According to the elastic modular ratio of the steel-copper worm gears, suitable materials for worm gears photoelastic model were selected. The worm photoelastic model was made in the way of steel mandrel surrounded with epoxy resin tooth, and the gear was made by the method of integral cast. Worm gears photoelastic model was assembled in the reduction box, and the load was applied by a torsion bar, and stress freezing was finished in the oven. Stress-difference line distribution property of sections of worm gear was observed on the photoelasticimeter 409-I. At last, the result of photoelastic method and the result of the finite element method (FEM) were compared. The result shows that differences of the maximum fringes value among the meshing teeth are minuteness, and secondary primary stress difference at the dedendum and the addendum of the tooth is larger than that near the pitch. In conclusion, the reliability of the photoelastic experiments of the worm gears is confirmed.

Key words Worm gears, Photoelastic method, Finite element method, Simulation, Experiments

引言

光弹性技术是一门将光学和力学相结合进行应力分析的实验技术,通过干涉条纹图获得全场应力

分布状态和数值,直观性强,能够有效地解决形状及载荷复杂的应力问题。近年来,许多学者利用该技术进行了三维冻结应力模拟实验,文献[1~5]分析了单个环氧树脂齿轮、钢齿轮-环氧树脂齿轮、钢蜗

收稿日期: 2010-03-28 修回日期: 2010-05-31
* 国家自然科学基金资助项目(50075089)
作者简介: 张彦钦,博士生,主要从事机械传动研究, E-mail: zhangyanqin@yahoo.cn
通讯作者: 张光辉,教授,博士生导师,主要从事机械设计研究, E-mail: zhanggh2900@163.com

杆-环氧树脂蜗轮等模型的应力状态。平面二次包络环面蜗杆传动的齿面形状和应力的分布状态十分复杂,相关应力分析的理论和实验少有报道,基于光测理论并且考虑弹性模量比值关系的三维应力分布研究尚未见到。

针对平面二次包络环面蜗杆传动,应用光弹性冻结技术,研究蜗轮齿面应力分布状态。根据钢-铜材料副弹性模量的比值,配制几种光弹性材料并测试其冻结弹性模量,选择适合蜗杆副模型的材料。分析蜗杆光弹性模型的制作方法,配制蜗杆副光弹性模型。将模型副装配在减速箱中,在烘箱内完成加载及应力冻结过程。观察蜗轮模型切片的应力等差图,分析应力分布状态。

1 光弹性模型的制备

1.1 材料配制及力学性能测试

光弹性模型材料采用 6101 环氧树脂、顺丁烯二酸酐和邻苯二甲酸二丁酯为原料^[6-7]。如表 1 所示,改变固化剂的含量,配置几种光弹性材料。将配制好的溶液注入模具中按照固化温度曲线固化成形,再经机械加工达到要求尺寸。

在冻结温度 115℃ 下,使用 YE2538 型程控静态电阻应变仪测试几种材料的弹性模量。试验装置同文献[8]:试件两端有圆孔,一端用于固定,一端悬挂砝码。试件的前后面各贴一对纵向和横向应变片测定弹性模量 E 和泊松比 μ 。由所加载荷及试件的截面积,计算应力,根据应力和应变的线性关系,计算 E 值。

根据钢-铜材料副弹性模量比 1.82,选取蜗杆副光弹性模型材料。蜗杆模型材料配比为 100:35:2,蜗轮模型材料配比为 100:25:2。两种材料的冻结弹性模量比值为 1.77,与钢-铜副的比值接近。

表 1 试样成分及弹性模量

Tab.1 Photoelastic materials and elastic ratio

编号	成分及质量比例			弹性模量 E/MPa
	环氧树脂	顺丁烯二酸酐	邻苯二甲酸二丁酯	
1	100	25	2	19.86
2	100	30	2	31.62
3	100	35	2	35.20

1.2 蜗杆副的光弹性模型

1.2.1 蜗杆光弹性模型的制作

蜗杆模型完全采用光弹性材料制作,较低的弹性模量难以满足加载部位刚性的要求;钢制蜗杆弹性模量大容易造成接触状态失真,降低了实验的可

靠性;兼顾加载部位刚性及齿部弹性模量的要求,提出嵌套的制作方法:制作蜗杆齿部的阴模,将阴模套装在钢制芯轴上浇注环氧树脂溶液,制得环氧树脂环抱钢质芯轴的模型,如图 1 所示。制作过程为:采用硅橡胶加入交联剂,搅拌均匀、真空处理后,浇注蜗杆齿部,常温静置,固化成形后取出蜗杆得到蜗杆齿部硅胶阴模,在阴模上预留浇注口和气孔;车削钢蜗杆齿部制得钢制芯轴,把硅胶阴模套装在钢制心轴上固定;配置环氧树脂溶液并搅拌均匀,注入浇注模型内,进行真空处理;将模具置于烘箱内进行第一次固化,在 $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$ 恒温固化成型后脱模,得到环氧树脂齿环抱钢制轴芯的蜗杆光弹性模型;对模型进行第二次固化,以 $5^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速度将温度升高到冻结温度 115°C ,恒温 24 h 后降温,控制降温速度不超过 $3^\circ\text{C}/\text{h}$,使其力学和光学性质逐渐趋于稳定。

1.2.2 蜗轮光弹性模型的制作

将金属蜗轮放置在模具中,配制硅胶溶液并浇注,静置至固化,取出蜗轮得到硅胶阴模。配制环氧树脂混合液,浇注后进行真空处理,置于烘箱内,固化过程也由二次固化成形工艺^[9]完成。

浇注蜗轮模型的同时,浇注一直径为 35 mm、厚 8 mm 的圆盘作为陪试件,用于测定冻结温度下材料的条纹值。

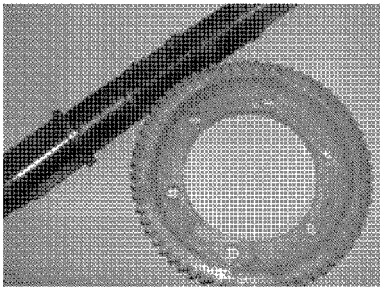


图 1 蜗杆副光弹性模型

Fig.1 Photoelastic model of worm gears

1.3 加载与应力冻结

为了保证正确的啮合关系,蜗杆副模型在减速箱内装配调试,检查啮合印痕。收紧蜗轮轴端的轴承游隙将蜗轮固定。在蜗杆轴端套装一扭力杆,通过在铅垂方向悬挂砝码实现加载。根据相似性理论和 Hertz 接触理论估算施加的载荷;施加扭矩为 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 。陪试件通过在顶部放置砝码实现加载,施加压力 P 为 19.24 N。

将装配好的减速器和圆盘试件置于烘箱中。为了避免箱体内部受热不均,到达冻结温度后恒温 1 h,测得蜗杆副在冻结温度下的静摩擦力矩后再施加载荷。冻结温度曲线可参照文献[6]。

取蜗轮参与啮合的五颗齿沿与蜗轮端面夹角为

γ 的方向在 X62W 型铣床上用 $\Phi 100\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 片铣刀铣削厚为 $1 \sim 2\text{ mm}$ 的 8 个薄片。 γ 为蜗杆喉部螺旋角,薄片位置及代号如图 2 所示。

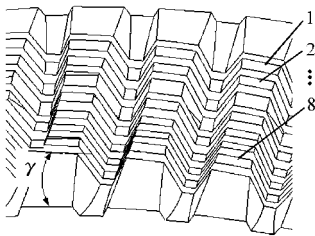


图 2 蜗轮切片示意图
Fig.2 Sketch map of gear section

2 实验结果及数据处理

2.1 蜗轮模型材料的条纹值

将圆盘垂直置于光路中,将看到次应力差(平面内两个主方向的正应力差)产生的应力等差条纹。圆盘冻结等差条纹如图 3 所示,根据对径受压圆盘中心点的条纹级次 N 和主应力差,材料条纹值为

$$f=8P/(DN\pi)$$

式中 D ——圆盘直径

计算得: $f=0.35\text{ N/mm}$ 。

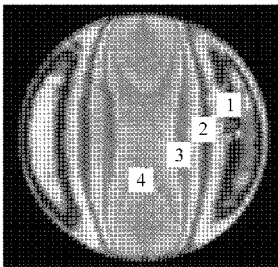


图 3 圆盘等差条纹
Fig.3 Stress equidifferent fringe on the disk

2.2 蜗轮模型切片应力分析

在 409-I 型平行光式光弹仪上对五对齿参与啮合的蜗轮切片进行观测^[10-11],切片最大次主应力差 $\sigma_{\max}=1.5\text{ MPa}$,切片上 1~5 颗啮合齿的应力等差线如图 4 所示,各齿最大等差条纹值差距较小,齿间应力分布比较均匀;沿齿高方向,齿根和齿顶的次主应力差比分度圆附近应力差大。各切片上的应力条纹数和应力值如表 2 所示。

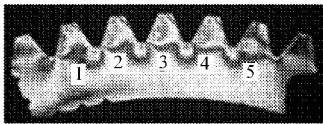


图 4 切片等差线
Fig.4 Stress equidifferent fringe on the worm wheel section

表 2 光弹性实验齿面等差条纹与应力
Tab.2 Equidifferent fringe and stress of photoelastic experiment

切片号	切片厚 /mm	齿面最大应力			齿根最大应力		
		齿号	条纹 级次 N	应力差 /MPa	齿号	条纹 级次 N	应力差 /MPa
1	1.5	1	1.5	0.35	1	1	0.12
2	1.0	1	2.0	0.70	1	1	0.35
3	1.1	2	2.0	0.64	1	2	0.64
4	1.4	3	3.0	0.75	3	2	0.50
5	1.2	3	4.0	1.20	3	2	0.60
6	1.5	4	5.0	1.20	3	3	0.72
7	1.4	4	6.0	1.50	3	3	0.75
8	1.4	4	5.0	1.25	3	2	0.50

3 与仿真分析的对比

3.1 陪试件实验结果与仿真分析的对比

在 ANSYS 环境下,对圆盘试件进行有限元分析,坐标系设置见图 5^[12-13]。将圆盘底端部分节点固定,在顶端沿 X 向施加压力。忽略加载和约束部位附近受应力集中影响的节点,根据仿真结果,与 Z 轴近似平行的第二主应力 S_2 在 $(0 \pm 10^{-4})\text{ MPa}$ 微小范围内变化,忽略不计,近似认为圆盘处于 XY 二维应力状态。因此,仿真分析中应力强度(XY 平面内的正应力差)与光弹性实验的次主应力差等效。

对比图 3 和图 5,图 3 中,材料条纹值表示单位厚度的光弹性试件产生一级等差线时相应的主应力差值,1~4 级条纹分别对应的次应力差为 0.044、0.088、0.131、0.175 MPa。这与图 5 中应力强度分布状态和数值都很接近。

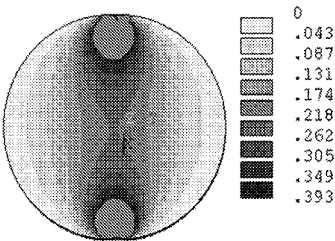


图 5 圆盘应力强度分布
Fig.5 Disk stress intensity distribution

3.2 切片应力的仿真分析及对比

根据光弹性模型,建立了光弹性蜗杆副的有限元模型。设置约束:限制蜗杆转轴的全部移动自由度,释放蜗杆轴绕自身轴线的转动自由度;约束蜗轮内圈的全部自由度。将蜗杆副传递的转矩换算成圆周力施加在蜗杆上。

根据仿真分析,各节点的主应力方向如图 6 所示;在齿厚方向靠近接触侧节点的第一、三主应力 S_1 、 S_3 方向与切片平面几乎平行,第二主应力 S_2 与蜗

轮轴向近似相切;靠近齿面自由侧的节点第一主应力方向与蜗轮轴向近似平行,因此,对靠近接触侧的节点而言,应力强度的分布状态和光弹性实验中的次主应力差分布是一致的;理论上,自由侧的应力强度分布不等价于光弹实验中的次应力差分布,但该侧齿面应力最小,不是主要考察对象,暂不深究。

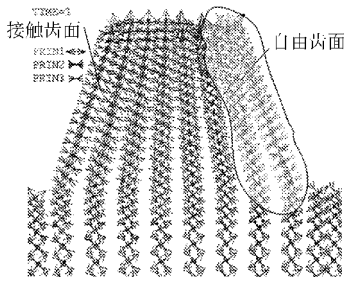


图 6 蜗轮齿节点主应力方向

Fig. 6 Node's principal stress direction on the worm wheel

对比图 4 和图 7,虽然光弹性应力等差条纹分布和仿真分析中的应力强度分布有差异,但是应力的分布状态却是相似的,最大应力差为 0.3 MPa。

4 结论

(1)应用电阻应变法测试了几种光弹性材料的

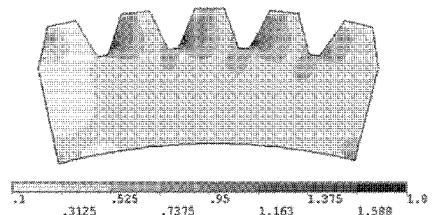


图 7 蜗轮齿平面应力强度分布

Fig. 7 Planar stress intensity distribution of worm wheel

冻结弹性模量,得到固化剂含量与冻结弹性模量的对应关系,制备的光弹性模型副的弹性模量比为 1.77,与钢-铜副的弹性模量比 1.82 较接近。

(2)蜗杆心轴用合金钢制作,齿部采用环氧树脂材料,浇注成形,既保证了加载部位的刚度需求,也满足了蜗杆齿部弹性模量的要求。

(3)通过应力冻结光弹性实验,得到了蜗轮光弹性模型切片上各齿的次主应力差沿齿高和齿厚的分布规律:同一切片上,各齿最大等差条纹值差距较小,齿间载荷分配均匀;沿齿高方向,齿根和齿顶的次主应力差比分度圆附近应力差大。

(4)对比光弹性实验结果和有限元计算结果:次主应力差与应力强度的等值线分布规律很相似,且数值差距小,验证了该次实验的可靠性。

参 考 文 献

- 1 Silva-Moreno A A, Ornelas Rodriguez F J, Torres R G, et al. Photoelasticity applied in industry[C] // Fifth Symposium Optics in Industry, 2006, 6046:4 619 ~ 4 629.
- 2 许洪斌,张光辉,加藤正名. 分阶式双渐开线齿轮的光弹试验与弯曲强度试验研究[J]. 机械工程学报,2000,36(8): 39 ~ 42.
Xu Hongbin, Zhang Guanghui, Masana Kato. Research for photoelastic experiment and bending strength experiment of double involute gear with ladder shape teeth[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000,36(8):39 ~ 42. (in Chinese)
- 3 薛春玉,郭懋林,严勇,等. 某直升机螺旋伞齿轮三维光弹性应力分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,1995, 27(5): 23 ~ 31.
Xue Chunyu, Guo Maolin, Yan Yong, et al. Three-dimensional photoelastic stress analysis for helical bevel gears of the helicopter[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1995, 27(5): 23 ~ 31. (in Chinese)
- 4 杨其俊,苏虹,王育钦. 斜齿圆柱齿轮三维光弹性实验[J]. 齿轮,1984,8(3):37 ~ 41.
Yang Qijun, Su Hong, Wang Yuqin. Three dimensional photoelastic experimental of helical gear[J]. Journal of Mechanical Transmission, 1984, 8(3):37 ~ 41. (in Chinese)
- 5 杨元兆,计欣华. 过渡态冻结技术及其在蜗轮副接触研究中的应用[J]. 中国机械工程,2005,16(4):585 ~ 588.
Yang Yuanzhao, Ji Xinhua. Technique of transition zone freezing and its application to worm pair contact[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(4):585 ~ 588. (in Chinese)
- 6 天津大学材料力学教研室光弹组. 光弹性原理及测试技术[M]. 北京:科学出版社,1980:127 ~ 165.
- 7 Pacey M N, James M N, Patterson Eann A. A new photoelastic model for studying fatigue crack closure[J]. Experimental Mechanics, 2005,45(1):42 ~ 52.
- 8 计欣华,邓宗白,鲁阳,等. 工程实验力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005: 54 ~ 67.
- 9 Wang Weichung, Tsai Yinghuang. Digital dynamic photoelastic and numerical stress analyses of a strip[J]. Journal of Vibration and Control, 2006, 12(8):927 ~ 938.
- 10 Dubey Venketesh N, Grewal Gurtej S. Photoelastic stress analysis under unconventional loading[C] // 2007 Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2007,4: 525 ~ 530.

参 考 文 献

- 1 桂贵生, 何庆. 高速加工机理与关键技术的研究进展[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 192 ~ 195.
Gui Guisheng, He Qing. Mechanism of high speed machining and its key technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 192 ~ 195. (in Chinese)
- 2 Xie J Q, Bayoumi A E, Zbib H M. Analytical and experimental study of shear localization in chip formation in orthogonal machining[J]. Mater. Eng. Performance, 1995, 4(1): 32 ~ 39.
- 3 Shaw M C, Vyas A. The mechanism of chip formation with hard turning steel[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1998, 47(1): 77 ~ 82.
- 4 Zhenbin H, Komanduri R. On a thermomechanical model of shear instability in machining[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1995, 44(11): 69 ~ 73.
- 5 Nakayama K. The formation of saw tooth chips[C]//Int. Conf. on Prod. Eng., Tokyo, 1974: 572 ~ 577.
- 6 Gentel A, Hoffmeister H W. Chip formation in machining Ti6Al4V at extremely high cutting speeds[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 49 ~ 52.
- 7 He N, Lee T C, Lau W S, et al. Assessment of deformation of a shear localized chip in high speed machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(1 ~ 3): 101 ~ 104.
- 8 Duan C Z, Wang M J, Pang J Z, et al. Calculational model of shear strain and strain rate within shear band in a serrated chip formed during high speed machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 178(1 ~ 3): 274 ~ 277.
- 9 Astakhov V P. Tribology of metal cutting[M]. Elsevier, 2006: 48 ~ 50.
- 10 Shi J, Liu C R. On predicting chip morphology and phase transformation in hard machining[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2006, 27(7 ~ 8): 645 ~ 654.
- 11 Dolinsěk S, Ekinvić S, Kopačv J. A contribution to the understanding of chip formation mechanism in high-speed cutting of hardened steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 157 ~ 158: 485 ~ 490.
- 12 Puerta Velásquez J D, Bolle B, Chevrier P, et al. Metalurgical study on chips obtained by high speed machining of a Ti-6wt. % Al-4wt. % V alloy[J]. Mater. Sci. Eng. A., 2007, 452 ~ 453: 469 ~ 474.
- 13 Costin L S, Crisman E E, Hawley R H, et al. On the localization of plastic flow in mild steel tubes under dynamic torsional loading[C]//Proc. 2nd Conf. on the Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain, Inst. Phys. Conf. Ser., No. 47, Oxford, 1979: 90 ~ 100.
- 14 Hartley K A, Duffy J, Hawley R H. Measurement of the temperature profile during shear band formation in steels deforming at high strain rates[J]. J. Mech. Phys. Solids, 1987, 35(3): 283 ~ 301.
- 15 Asay J R, Kerley G I. The response of materials to dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 5(1 ~ 4): 69 ~ 99.
- 16 周惠久, 黄明志. 金属材料强度学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 325 ~ 331.

(上接第 211 页)

- 11 Karalekas D E, Agelopoulos A. On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations[J]. Materials and Design, 2006, 27(2): 100 ~ 106.
- 12 Chen T Y, Chang Y B, Chen J K. Finite element simulation of scattered-light photoelastic fringe patterns[C]//11th International Congress and Exhibition on Experimental and Applied Mechanics, 2008: 1 657 ~ 1 661.
- 13 Xu Lizhong, Zhang Lei. Numerical simulation of stress distribution for toroidal drive[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2006, 30(2): 209 ~ 221.