

激光衍射在拉丝模孔型测量中的研究

杨 萍, 张玉杰

(陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西 西安 710021)

摘 要:随着拉丝模孔径越来越小型化,常用的拉丝模内孔参数测量方法已经不能满足测量的要求。本文将旋转测量法和激光衍射相结合,实现了微小孔孔型参数的高精度测量。测量过程中,通过控制步进电机不断旋转拉丝模中心轴而产生不同的衍射效果,在 CCD 上分别采样圆孔和椭圆孔衍射图像,利用衍射图像和孔型参数之间的函数关系实现拉丝模各参数的测量。最后通过测试得出各参数的测量误差约为 1%,实验结果表明该系统可靠性好、精度高。

关键词:拉丝模具;孔型;激光衍射;旋转法;微小孔

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.02.004

Research on laser diffraction in pass measurement of wire drawing dies

YANG Ping, ZHANG Yu-jie

(College of Electrical & Information Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: As the aperture of wire drawing die is becoming smaller and smaller, the parameter measurement of the common wire drawing die inner hole can't meet the requirement. The high precision measurement of micro aperture pass was realized by combining the rotation measurement and laser diffraction. In the measurement process, center shaft of drawing die was continuously rotated by controlling of stepper motor, which produced different diffraction effects. The diffraction images with round or elliptical hole were sampled respectively on the CCD. The pass parameters of drawing die were measured through the function relationship between diffraction images and pass parameters. Finally, the measurement error of about 1% was obtained. The results show that the system has good reliability and high precision.

Key words: wire drawing dies; pass; laser diffraction; rotation method; microaperture

1 引 言

拉丝模是金属线材生产过程中必不可少的器件,拉丝模的内孔参数直接影响线材的合格率和产量。由于现在的拉丝模孔径越来越小型化,目前对

拉丝模的内孔参数测量常用的方法有接触法和液体浇注成像法等^[1],接触法测量的孔径不能太小,使用场合大大受限;而液体浇注成像法速度慢、精度差,不适应大规模生产的要求。因此探寻新的方法

基金项目:陕西省科技计划项目(No. 2014K07-17)资助。

作者简介:杨 萍(1979-),女,硕士,讲师,主要从事信号检测和处理及嵌入式系统的研究与开发。E-mail: yangping@sust.edu.cn

收稿日期:2016-06-03

进行孔型参数测量已经成为亟待解决的问题。针对上述不足和问题,本文提出激光衍射法进行拉丝模孔型参数测量。

2 拉丝模的孔型结构

为了适应拉丝速度快、精度高的要求,T. Maxwell 等提出了拉丝模的“直线型”理论,该拉丝模具孔型结构如图 1 所示^[2]。按照线材进入拉丝模的先后顺序,拉丝模的结构可以分为入口区、压缩区、定径区、出口区等四部分,其中压缩区、入口区、出口区与轴向的夹角分别表示为 a 、 b 、 c ,定径区的直径用 ϕD 表示。由于金属丝的形变过程主要是在压缩区进行,如果压缩角过大,就起不到应有的压缩作用,相反如果太小,则拉丝模的寿命将大大降低^[3]。拉丝模中定径带的作用是最终控制拉拔后的钢丝直径,是为了保证拉拔后钢丝的圆度、伸直性和平滑光亮的表面状态。因此,定径带的测量精度必须高。为了防止拉丝模极易被磨损,定径带的长度应为其直径的 35% ~ 50%。因此这部分的参数就是系统主要的测量目标。

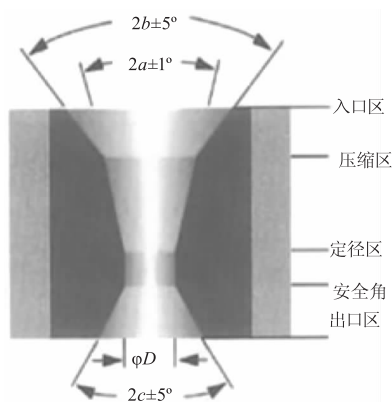


图 1 拉丝模孔型结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of wire drawing die pass

3 激光衍射测量装置

为了实现基于激光衍射的拉丝模内孔参数的测量,搭建激光衍射测量装置如图 2 所示。

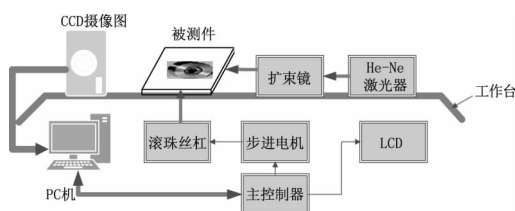


图 2 衍射装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of diffraction device

测量装置选用 He - Ne 激光器,通过扩束镜再入射到拉丝模孔。扩束镜的功能是降低激光束的发散角,进而使激光器聚焦光斑更小。在 CCD 上采集衍射图样,通过 USB 接口送到上位机进行图像处理,从而计算出拉丝模的孔型参数。

4 激光衍射测量拉丝模孔型的理论分析

4.1 圆孔的夫琅禾费衍射

为了测量拉丝模孔型参数,本系统采用旋转法,即旋转拉丝模中心轴,当激光束平行于定径区时,产生衍射现象的如图 3 所示。

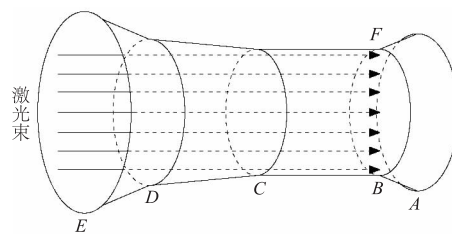


图 3 激光束平行于拉丝模中心轴入射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of incoming for laser beam parallel to the drawing die center axis

由光学衍射原理可知,当平面光通过一足够小的圆孔时,会发生夫琅禾费衍射现象^[4]。接收屏上 P 点衍射条纹的光强分布为^[5]:

$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(x)}{x} \right]^2 \quad (1)$$

$J_1(x)$ 为一阶贝塞尔函数, x 可以用衍射角 θ 及圆孔半径 a 表示:

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin\theta \quad (2)$$

第一级暗环对应的衍射角为 $\theta = \sin\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$ 。

中央光斑的直径为 D , P 点的位置由衍射角 θ 来确定^[6],若屏上 P 点离中心 O 的距离为 ($r \approx f \sin\theta$), 即 $D = 2r = 2f \sin\theta$, 圆孔半径 a , λ 是激光波长,则中央光斑的直径 D 为:

$$D = 2f \sin\theta = 2f \frac{x_{01} \lambda}{2\pi a} = \frac{x_{01}}{\pi} \cdot \frac{\lambda f}{a} = 1.22 \frac{\lambda f}{a} \quad (3)$$

所以只要测得 D , 就可以求得圆孔的半径 a 。

4.2 椭圆孔的夫琅禾费衍射

若继续旋转拉丝模,即与压缩区的边沿 CD 平行时,激光束以夹角为 ϕ 斜入射到椭圆孔,此时由于夹角的存在,由此产生了光程差的变化,衍射场由对称的圆环变为非对称的椭圆环^[7],如图 4 所示,由于衍射孔和衍射角的不同,衍射场存在着巨大的差异。

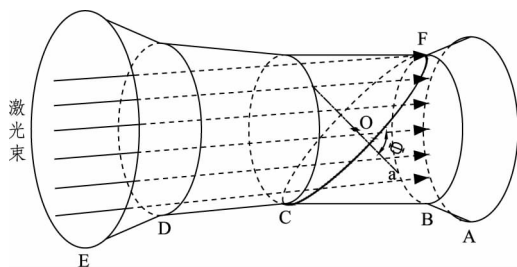


图 4 激光束平行于压缩区边沿入射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of incoming laser beam parallel to the reduction cone

由夫琅禾费衍射可知:

$$U(P) = c \iint_S e^{-ik(xp+yq)} dx dy \quad (4)$$

式中, $c = \sqrt{I_0/D}$, D 是为衍射孔的面积; I_0 为入射光强度; (x, y) 为衍射孔任意一点坐标, (p, q) 确定着衍射图像的形状^[8]。 S 是衍射光孔的区域, 由方程 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 (a > b)$ 所确定。

设 $x = ap \cos \phi$, $y = bp \sin \phi$, $ap = r \cos \theta$, $bq = r \sin \theta$ 代入式(4), 得:

$$U(P) = abc \int_0^1 \rho d\rho \int_0^{2\pi} e^{-ikr p \cos(\phi - \theta)} d\phi \quad (5)$$

由于 $\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{ix \cos \phi} d\phi = J_0(x)$, $\int_0^x \tau J_0(\tau) d\tau = x J_1(x)$, 所以式(5)的计算结果为 $U(P) = \pi abc \left[\frac{2 J_1(kr)}{kr} \right]$, 衍射光强度为 $I(P) = U^2(P) = \left\{ \frac{2 J_1(kr)}{kr} \right\}^2$ 。自中央明亮区域向外的各级暗条纹^[9], 是由反函数 $\left[\frac{2 J_1(X)}{X} \right]^2 = 0$ 给出的 x 值所确定。因此:

$$kr = x \quad (6)$$

由式(5)和(6)可得各级暗环的方程为:

$$\frac{p^2}{\left(\frac{x}{ak}\right)^2} + \frac{q^2}{\left(\frac{x}{bk}\right)^2} = 1 \quad (7)$$

由此可见, 中央衍射图像是 $\frac{x}{ak}$ 和 $\frac{x}{bk}$ 为长短轴的椭圆, 与光孔的长短轴相反。这一衍射的椭圆度与旋转的夹角存在着确定的函数关系, 由此可以确定压缩区的倾角。

5 系统验证及测试结果分析

当激光入射拉丝模时, 形成类圆形的衍射图像^[10], 当沿轴向不断旋转拉丝模时, 反映在衍射场图案的变化上, 也就是形成类似于椭圆的衍射图像。在图 2 所示的测量装置中, 当激光沿拉丝模中心轴入射时实测的图像及二值化图形如图 5 所示。当激光束沿平行于压缩区边沿 CD 入射时实测的图像及二值化图形如图 6 所示。

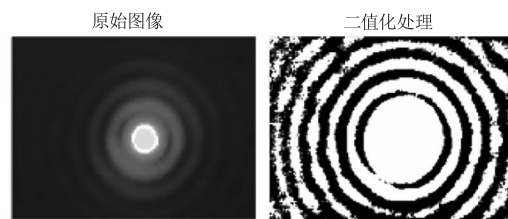


图 5 当激光沿拉丝模中心轴入射时衍射图像及二值化图

Fig. 5 Image of diffraction and binarization incoming for laser beam parallel to the drawing die center axis

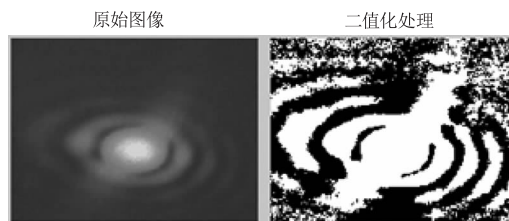


图 6 当激光束沿平行于压缩区边沿 CD 入射时的衍射图像及二值化图

Fig. 6 Image of diffraction and binarization incoming for laser beam parallel to the reduction cone

本系统对某生产单位提供的两种硬质合金拉丝模具分别进行测量, 模具的孔型参数测量结果如表 1 所示。压缩区及定径区长度测量绝对误差在 0 ~ 0.04 mm, 相对误差约为 1%; 入口区及压缩区角度的绝对误差在 0.15° ~ 0.83°, 相对误差约为 1%。

表 1 孔型参数测量结果

Tab. 1 Result of pass parameter measurements

孔型参数	模具 1				模具 2			
	标准值	测量值	绝对误差	相对误差	标准值	测量值	绝对误差	相对误差
压缩区长度/mm	3.40	3.36	0.04	1.18%	7	6.98	0.02	0.29%
定径区长度/mm	1.5	1.5	0	0	1.6	1.58	0.02	1.25%
入口区角度	68°	68.83°	0.83°	1.22%	56°	55.37°	0.63°	1.12%
压缩区角度	20°	20.24°	0.24°	1.2%	12°	12.15°	0.15°	1.25%

6 结 论

本文将旋转测量法和激光衍射结合到一起,实现了微小孔的一次全参数测量,系统运行稳定且精度高,在硬质合金拉丝模微小孔径测量中具有很高的工程实用价值,并且该系统已经推广到实际的测量中。

参考文献:

- [1] MA Chunying. Influence factors of punching die life and methods to prolong life of die[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(7): 106-108 (in Chinese)
麻春英. 冲模寿命的影响因素及提高寿命的措施[J]. 煤矿机械, 2010, 31(7): 106-108.
- [2] ZHANG Yujie, MENG Mengmeng. Design of drawing die hole measuring system based on ARM9[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(11): 1357-1359 (in Chinese)
张玉杰, 孟蒙蒙. 基于 ARM9 的拉丝模孔型测试系统设计[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(11): 1357-1359.
- [3] YANG Ping, ZHANG Yujie, LI Qijun. Design of aperture measurement system for the wire drawing die based on laser diffraction[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(10): 16-18. (in Chinese)
杨萍, 张玉杰, 李秦君. 基于激光衍射的拉丝模具孔径测量系统设计[J]. 煤矿机械, 2015, 36(10): 16-18.
- [4] JI Yunfei, GENG Lin, FENG Guoxu, et al. New development of laser imaging technology[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1413-1417. (in Chinese)
季云飞, 耿林, 冯国旭, 等. 激光成像技术的新发展[J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1413-1417.
- [5] Born Wolf. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [6] ZHAO Jianjun, NIU Haisha, CHEN Hongye, et al. Theoretical study of detecting laser information by sinusoidal grating[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(7): 799-802. (in Chinese)
赵建君, 牛海莎, 陈红叶, 等. 利用平面透射光栅探测激光信息的理论研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(7): 799-802.
- [7] DAI Bing. Fraunhofer diffraction of the similar circular ring [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(1): 9-11. (in Chinese)
戴兵. 类圆环的夫琅和费衍射[J]. 应用光学, 2004, 25(1): 9-11.
- [8] FAN Donghong, HUANG Mali, LIU Jifeng. Fraunhofer diffraction of similar circular hole and similar circular ring applied Mathematica[J]. Journal of Henan normal University: Natural Science Edition, 2008, 36(4): 80-82. (in Chinese)
樊东红, 黄玛莉, 柳继峰. 利用 Mathematica 研究类圆孔和类圆环的夫琅和费衍射[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2008, 36(4): 80-82.
- [9] LI Jijun, XU Dahai, TIAN Yonghong. Simulation of the fraunhofer diffraction of circular ring and rectangular ring with Matlab GUI[J]. Journal of Changshu Institute Technology: Natural Sciences, 2011, 25(8): 111-114. (in Chinese)
李继军, 徐大海, 田永红. 用 Matlab GUI 模拟圆环和矩形环夫琅和费衍射[J]. 常熟理工学院学报: 自然科学, 2011, 25(8): 111-114.
- [10] ZHANG Xin. Research and manufacturing of wire drawing die aperture measuring apparatus[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
张鑫. 拉丝模具孔径测量仪的研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.