

表面质量控制及检测

# 波前传感器电铸镍层应力实时检测精度评估

罗坤杰, 蒋炳炎, 强军, 董彦灼, 柴思佳

(中南大学 机电工程学院 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

**摘要:** **目的** 搭建电铸应力实时检测平台, 评估其测量精度, 并探明电化沉积过程中镍层平均内应力的变化规律。**方法** 采用横向剪切波前传感器搭建电铸应力实时检测平台, 通过测量在铸层应力作用下电铸基底弯曲的曲率半径, 利用 Stoney 公式计算铸层平均应力。采用参考球面反射镜评估横向剪切波前传感器曲率半径的测量精度, 并在  $0.5 \text{ A/dm}^2$  电流密度下进行电铸应力实时检测实验, 对铸层平均应力测量极限进行评估, 同时对检测误差进行分析。**结果** 横向波前传感器曲率半径测量精度为 99.22%, 在  $0.5 \text{ A/dm}^2$  电流密度下, 所搭建的铸层应力实时检测平台可测量的最小厚度为  $5.1 \mu\text{m}$ , 由曲率测量波动带来的应力检测误差为 1.3 MPa。实验测得铸层平均应力随铸层厚度的增加而变大, 当铸层厚度达到  $30 \mu\text{m}$  左右, 铸层平均应力趋于稳定, 应力大小为 79.7 MPa。同时发现, 当铸层厚度小于  $30 \mu\text{m}$  时, 沿电铸基底长度方向的铸层平均应力明显大于宽度方向铸层平均应力, 随铸层厚度的增加, 两个方向的应力大小趋于等值。**结论** 采用横向剪切波前传感器搭建的电铸应力检测平台, 能有效对铸层应力进行高精度的实时测量, 为精密电铸过程中应力变化规律的研究提供了检测技术基础。

**关键词:** 电化沉积; 精密电铸; 涂层应力; 实时检测; Stoney 公式; 横向剪切波前传感器

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)09-0357-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.041

## Accuracy Evaluation of Real-time Detection on Internal Stress of Nickel Electroforming Based on Wave Front Sensor

LUO Kun-jie, JIANG Bing-yan, QIANG Jun, DONG Yan-zhuo, CHAI Si-jia

(State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**ABSTRACT:** The work aims to build a real-time detection platform of electroforming stress to evaluate the measurement accuracy and verify the variation laws of the average internal stress of the nickel coating in the process of electrochemical deposition. Lateral shear wave front sensor was used to build a real-time detection platform of electroforming stress and then

收稿日期: 2019-11-01; 修订日期: 2020-07-25

Received: 2019-11-01; Revised: 2020-07-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51575540); 国家自然科学基金重点国际 (地区) 合作研究项目 (51920105008); 湖南省研究生创新项目 (CX20190113)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51575540), the International (Regional) Cooperation Research Plan of National Nature Science Foundation of China (51920105008), and the Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (CX20190113)

作者简介: 罗坤杰 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微结构零件精密电铸。

Biography: LUO Kun-jie (1994—), Male, Master, Research focus: micro structure parts precision electroforming.

通讯作者: 蒋炳炎 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为微纳制造。邮箱: jby@csu.edu.cn

Corresponding author: JIANG Bing-yan (1963—), Male, Doctor, Professor, Research focus: advanced manufacturing of polymers. E-mail: jby@csu.edu.cn

引文格式: 罗坤杰, 蒋炳炎, 强军, 等. 波前传感器电铸镍层应力实时检测精度评估[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 357-363.

LUO Kun-jie, JIANG Bing-yan, QIANG Jun, et al. Accuracy evaluation of real-time detection on internal stress of nickel electroforming based on wave front sensor[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 357-363.

calculate the average stress of the electroforming layer with Stoney formula by measuring the radius of curvature of electroformed substrate under the electroforming layer stress. A reference spherical mirror was adopted to evaluate the measurement accuracy of the radius of curvature of the lateral shear wave front sensor, and the average stress measurement limit and the detection accuracy of the electroforming layer were evaluated by carrying out real-time detection experiment to the internal stress of electroforming layer under the current density of  $0.5 \text{ A/dm}^2$  and the detection error was analyzed at the same time. The measurement accuracy of radius of curvature of lateral shear wave front sensor was 99.22%. Under the current density of  $0.5 \text{ A/dm}^2$ , the measureable minimum thickness of the real-time detection platform built for internal stress of electroforming layer was  $5.1 \text{ }\mu\text{m}$ , and the measurement error of internal stress brought by fluctuations of measured curvature was  $1.3 \text{ MPa}$ . The experiment illustrated that the thicker the electroforming layer was, the more intensified the average stress of electroforming layers was. When the thickness of the electroforming layer reached about  $30 \text{ }\mu\text{m}$ , the average stress of electroforming layers was stabilized, with the stress of  $79.7 \text{ MPa}$ . Meanwhile, if the thickness of layer was under  $30 \text{ }\mu\text{m}$ , the average stress of electroforming layer along the length of electroforming base was much more intensified than that along the width. As the increasing of the thickness of the electroforming layer, the average stress of electroforming layer in two directions tended to be the same. The real-time detection platform for internal stress of electroforming layer built by a lateral shear wave front sensor can effectively carry out high-precision real-time measurement to the stress of electroforming layers, which provides a detection basis for the study of stress variations in the process of precision electroforming.

**KEY WORDS:** electrochemical deposition; precision electroforming; coating stress; real-time detection; Stoney formula; lateral shear wave front sensor

精密电铸技术凭借复制精度高、成本低的优点,已广泛应用于微纳成形加工、表面涂层制备领域,如精密模芯成形<sup>[1]</sup>、精密光学元件制作<sup>[2]</sup>、超疏水功能表面复制<sup>[3-4]</sup>、MEMS 器件制造<sup>[5]</sup>等,其主要用于制作各种精密、异型、复杂结构的零件及具有一定性能特性的涂层结构<sup>[6]</sup>。但铸层中存在的宏观内应力会影响制件的结构成形精度和机械性能,导致精密电铸件结构变形,涂层产生裂纹,甚至出现涂层脱落的现象<sup>[7]</sup>。为解决此类问题,需对精密电铸内应力的产生机理进行深入研究,而高精度的表面涂层应力检测方法,是探明铸层内应力产生机理的前提条件,是解决铸层应力问题的技术基础,在精密电铸成形工艺研究中具有关键的作用。

针对上述问题,国内外众多研究人员开展了表面涂层内应力检测方法和技术的研究,其中具有代表性的检测方法有 X 射线衍射法和拉曼光谱法<sup>[8-9]</sup>。这两种方法虽然能直接测量涂层内应力,但其只能在涂层沉积完成后,对制件进行离线检测,无法实时观察沉积过程中应力的变化情况。对铸层应力进行实时检测的常见方法有薄片阴极弯曲法、圆片变形法、螺旋收缩仪法等,此类方法均是通过检测电铸基底在铸层应力作用下产生的变形,来计算铸层应力,可对铸层应力进行实时检测。但基底变形尺寸的传统测量方法误差较大,直接影响铸层应力的检测精度。德国哥廷根大学 Briker<sup>[10]</sup>采用测量基底弯曲变形的办法,对电子束蒸镀薄膜的应力进行了检测,利用光杠杆原理测量基底弯曲程度,计算沉积层平均内应力,其光电位置传感器对激光偏转距离进行测量的分辨率为  $100 \text{ }\mu\text{m}$ ,

灵敏度较低。同时,采用的双光束反射测量系统较为复杂,设备日常调试、保养要求较高,测量时容易出现操作误差。东京大学 Kume<sup>[11]</sup>采用 Shack-Hartmann 波前传感器搭建电铸应力实时检测平台,对电铸基底表面直径为  $5 \text{ mm}$  的圆形区域弯曲曲率进行实时检测,简化了测量系统。但 Shack-Hartmann 波前传感器分辨率有限,在铸层厚度为  $20 \text{ }\mu\text{m}$  时,其铸层应力测量误差为  $8 \text{ MPa}$ ,误差占比为 26.7%,其检测精度有待提升。

随着激光波前检测技术的发展,横向剪切波前检测方法相比于 Shack-Hartmann 波前检测,有着更高的波前检测精度及空间分辨率<sup>[12]</sup>。针对电铸铸层平均应力实时检测的高精度要求,本文采用横向剪切波前传感器搭建铸层应力实时检测平台,通过测量基底局部弯曲曲率,计算铸层平均应力,并评估其测量精度,同时分析铸层应力随铸层厚度的变化规律,为电铸内应力的研究提供基础。

## 1 实验

### 1.1 铸层平均应力检测原理

电铸过程中,阳极镍失去电子发生氧化反应产生镍离子,阴极得到电子发生还原反应产生镍原子,镍原子逐渐在阴极沉积,实现制件的成形。其基本原理如图 1 所示。在铸层生长的过程中,金属晶格缺陷使铸层产生内应力,在内应力的作用下,阴极基底发生弯曲变形。铸层应力分为拉应力和压应力,在拉应力作用下,基底向上弯曲;当铸层应力为压应力时,基底向下弯曲,如图 2 所示。

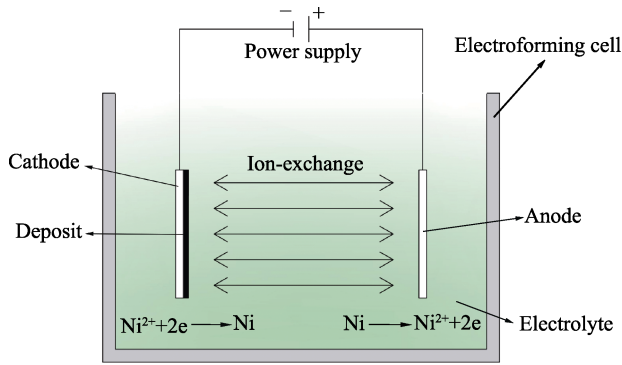


图 1 电铸基本原理

Fig.1 Basic principle of electroforming

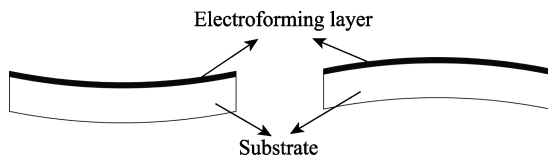


图 2 电铸基底弯曲示意图

Fig.2 Schematic diagram of electroforming base bending

为测量铸层应力，1909 年，Stoney 建立了铸层平均应力与基底曲率半径的关系式<sup>[13]</sup>，其理论公式为：

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\nu_s)h_f R} \quad (1)$$

式中， $\sigma_f$ 为铸层应力值； $E_s$ 为基底弹性模量； $h_s$ 为基底厚度； $\nu_s$ 为基底泊松比； $h_f$ 为铸层厚度； $R$ 为基底弯曲曲率半径。该公式主要的基本假设条件有：

①基底材料的弹性模量与沉积层材料的弹性模量相等或相近；②铸层厚度远小于基底厚度；③基底材料为各向同性及线弹性；④铸层材料各向同性；⑤基底不受其他外力作用。铸层厚度计算公式为：

$$h_f = \frac{\eta J t e}{\rho} \quad (2)$$

式中， $\eta$ 为阴极电流效率； $J$ 为阴极电流密度； $t$ 为电沉积时间； $e$ 为镍的电化学当量； $\rho$ 为镍的密度。曲率半径的测量精度决定了 Stoney 公式的铸层应力计算精度，高精度的电铸基底曲率测量方法是铸层平均应力检测的关键。

## 1.2 电铸基底曲率半径测量方法

本文采用法国 PHASICS 公司生产的横向剪切波前传感器（SID4-HR）测量电铸基底弯曲曲率半径，传感器孔径为  $8.9 \text{ mm} \times 11.8 \text{ mm}$ ，采样点为  $400 \times 300$ ，分辨率为  $29.6 \mu\text{m}$ 。测量平台主要由激光发生器（波长  $\lambda$  为  $532 \text{ nm}$ ）、波前传感器、电铸系统组成，检测方法如图 3 所示。激光发射后，经基底背面反射至横向剪切波前传感器，利用四波横向剪切干涉技术，对激光参数进行分析，获取激光相差分布图，拟合激光相差分布图曲率半径，通过检测到的波前相差分布，反映电铸基底形貌。为消除基底初始微弯曲带来的测量误差，将电铸前的激光反射波前相差分布作为参考值，检测电铸过程中激光反射波前相差的实时变化情况。在铸层应力作用下，基底发生弯曲变形，同时激光相差分布图逐渐弯曲为球面，如图 4 所示，横坐标表示测量范围，纵坐标  $PV$  指相差分布中波面与波谷之间的差值。通过测量得出的激光相差分布曲率半径，可转换为基底弯曲曲率半径，计算公式为：

$$R_j = (R_i \pm L) \times 2 \quad (3)$$

式中， $R_j$ 为基底曲率半径， $R_i$ 为激光相差分布图曲率半径， $L$ 为波前传感器到测量基底表面的距离。当基底为凹面时，式中取“+”号，凸面时，取“-”号。

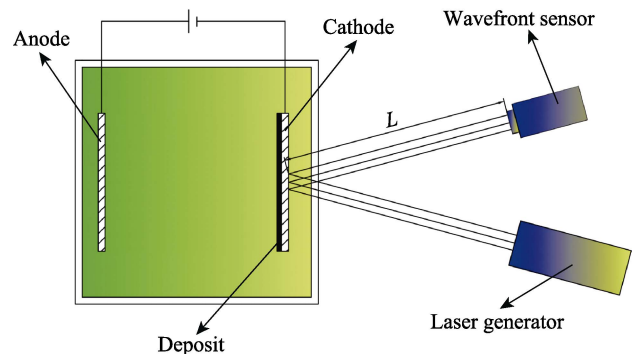


图 3 铸层应力检测方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of detection method of electroforming layer stress

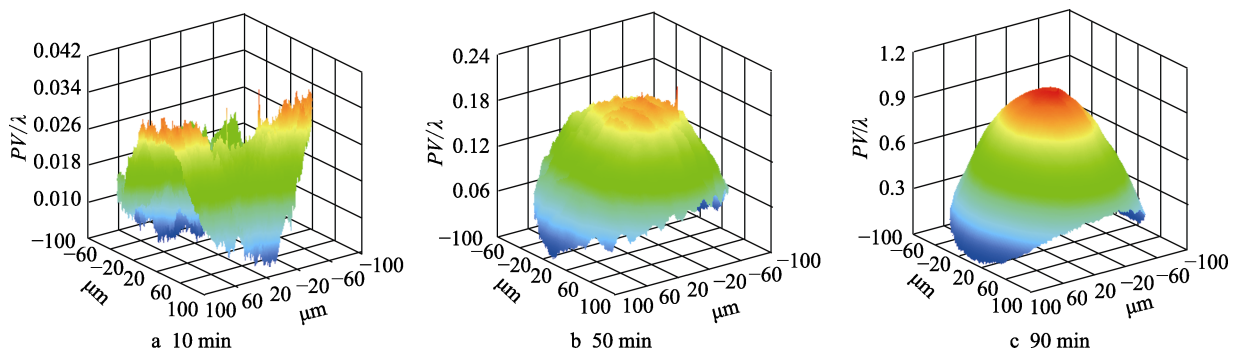


图 4 反射激光波前相差分布转变图

Fig.4 Transformation diagram of wave front phase difference distribution of reflected laser

图5为本实验搭建的电铸应力实时检测平台,为满足 Stoney 公式中基底材料与沉积层弹性模量相近的假设条件,采用矩形硅片作为电铸基底<sup>[14]</sup>,其中镍的弹性模量为 207 GPa,硅的弹性模量为 170 GPa,基底尺寸为 20 mm×80 mm。同时,为保证激光在电铸基底背面不出现发散现象,将硅基底进行单面抛光处理。采用悬臂的方式进行装夹,使电铸基底在铸层应力的作用下自由变形,图6为电铸基底装夹示意图。

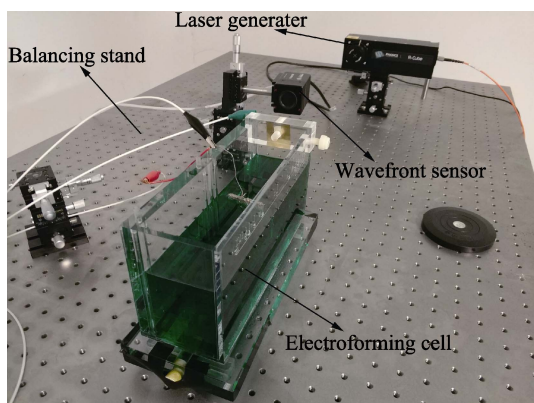


图5 电铸应力实时检测实验平台

Fig.5 Real-time detection platform for internal stress of electroforming layer

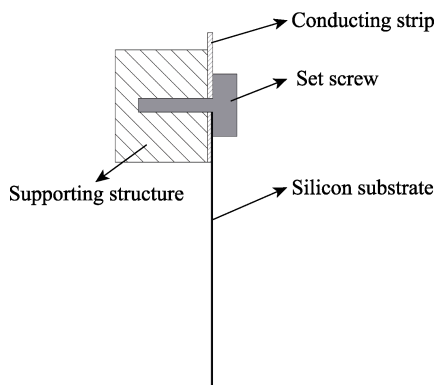


图6 电铸基底装夹示意图

Fig.6 Schematic diagram of clamping electroforming base

### 1.3 实验条件及参数

采用无添加剂的电铸液进行电铸,配方如表1所示。采用可溶性纯镍为阳极材料,阴极基底厚度为 0.523 mm,阴阳极间距为 100 mm。电铸温度为 19~21 ℃,电铸液 pH 值控制在 4.2~4.5。采用辰华 CHI660E 电化学工作站作为电铸电源,输出恒定直流电流。

表1 电铸液主要成分及其含量

Tab.1 Main components and contents of electrolyte

Components	Contents
$\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	350
$\text{NiCl}_2/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	10
$\text{H}_3\text{BO}_3/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	30

图7为电铸应力检测区域示意图,电铸区域为 20 mm×50 mm。横向剪切波前传感器检测直径为 6 mm 的圆形区域,其测量位置位于电铸区中心。

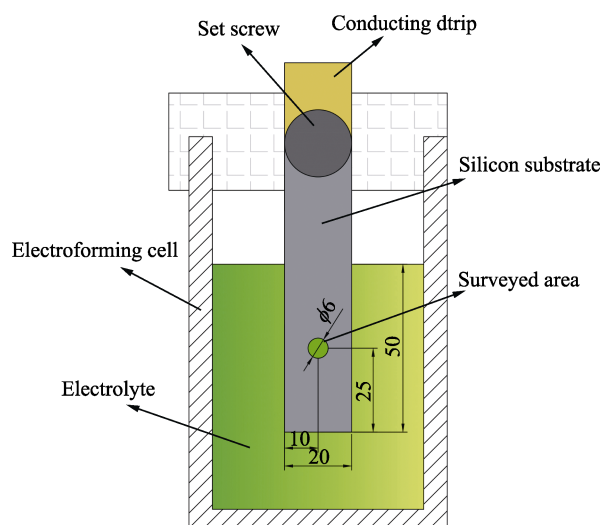


图7 电铸应力检测区域示意图

Fig.7 Schematic diagram of detective area of electroforming stress

### 1.4 实验方法

1) 采用横向波前传感器测量参考球面反射镜的表面曲率半径,评估曲率半径测量精度。

2) 采用徕卡高真空溅射镀膜仪 LeicaEMSCD500 对硅基底非抛光面进行导电化处理,喷金时间为 240 s,金层厚度约为 60 nm。将基底装夹在固定架上,在 0.5 A/dm<sup>2</sup> 电流密度下电铸 8 h,同时对电铸基底弯曲曲率进行实时检测,采样间隔时间为 10 min,采用 Stoney 公式计算铸层平均应力。

3) 在无阴极电流的情况下,对上述实验后的电铸基底进行曲率半径测量,测量时间为 2 h,采样间隔时间为 2 min,评估曲率半径的测量稳定性,分析由曲率测量波动导致的铸层应力测量误差。

## 2 结果及分析

本研究主要讨论横向剪切波前传感器测量曲率半径的精度及极限,分析由曲率测量波动导致的应力计算误差。同时,采用实时检测的方式研究铸层平均应力与铸层厚度的关系,分析基底不同方向铸层平均应力的变化规律。

### 2.1 曲率半径测量精度评估

采用曲率半径为 994.6 mm 的凹面反射镜作为参考镜,评估曲率半径测量精度。图8为采用横向剪切波前传感器测得的参考镜激光相差分布图,在检测区域内,相差分布图呈向下凹陷的规则圆锥状。相差分布图轮廓如图9所示,最高点与最低点的相差为 32.638 λ,



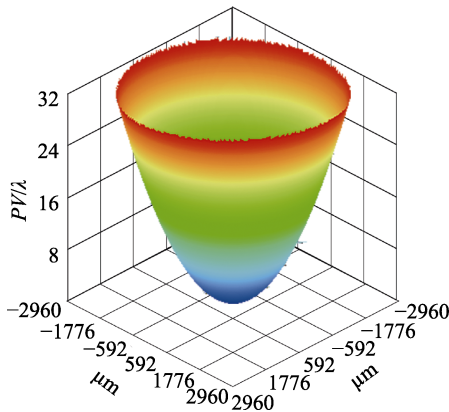


图 8 参考镜反射激光相差分布图

Fig.8 Phase difference distribution of reflected laser by reference mirror

拟合得到波前相差分布图曲率半径为 262.9 mm。波前传感器到参考镜的距离  $L$  为 230 mm, 经公式(3)转换得到参考镜曲率半径为 985.8 mm, 曲率半径测量精度为 99.22%。因此, 采用横向剪切波前传感器可对光滑表面弯曲曲率半径进行高精度检测。

## 2.2 曲率半径测量极限评估

在所述实验条件下, 得到了在电铸过程中反射激光相差的变化情况, 图 10 分别为电铸 10、30、50 min 时的激光相差分布图。在电铸时间小于 50 min 时, 激光相差分布图 of 不规则形状, 且无明显变化。当电铸时间为 50 min, 即铸层厚度达到 5.1  $\mu\text{m}$  时, 波前相差分布图转变为半球状, 基底曲率半径为 333.6 m,

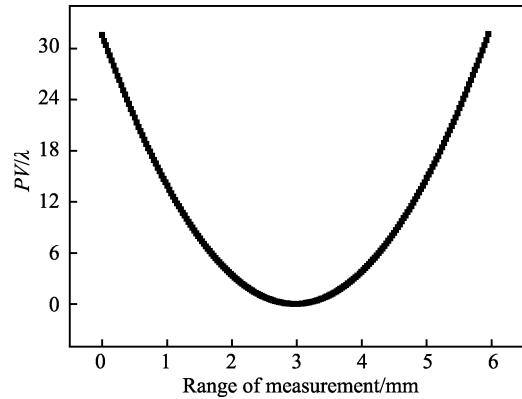


图 9 参考镜反射激光相差分布轮廓图

Fig.9 Profile of phase difference distribution of reflected laser by reference mirror

由 stoney 公式计算得出铸层平均应力为 6.3 MPa。说明横向剪切波前传感器对基底表面曲率半径的测量范围有限, 在铸层较薄的情况下, 基底变形较小, 无法拟合曲率半径。由 Stoney 公式可知, 当应力一定时, 基底弯曲曲率半径与基底厚度的平方成正比。因此, 在采用横向剪切波前传感器实时测量铸层平均应力时, 在铸层厚度一定的情况下, 基底越薄, 则产生相同弯曲变形所需的应力越小, 即检测系统的灵敏度越高。由上述结果可知, 横向剪切波前传感器测量的最大曲率半径为 333.6 m, 当基底厚度为 0.523 mm、电流密度为 0.5 A/dm<sup>2</sup> 时, 电铸应力实时检测平台测量的极限厚度约为 5.1  $\mu\text{m}$ 。

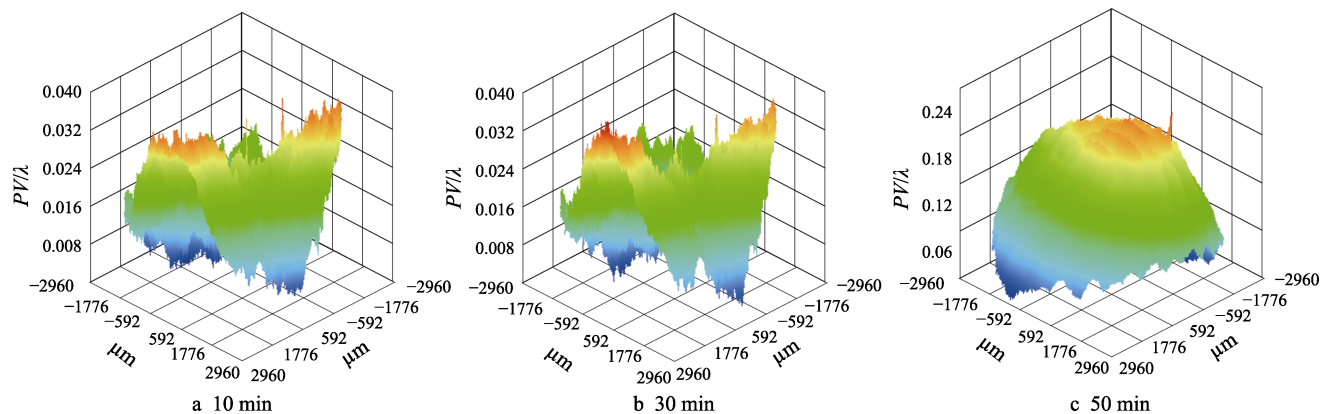


图 10 基底反射激光波前相差分布变化图

Fig.10 Variation diagram of wave front phase difference distribution of reflected laser by base

## 2.3 电铸应力实时检测误差分析

采用波前传感器对激光相差进行测量的过程中, 在外部环境光源变化及电铸液流动等因素的作用下, 激光相差值会发生一定变化, 直接影响基底曲率半径的测量稳定性, 而基底曲率半径测量值的波动是影响铸层平均应力测量精度的主要原因。因此, 为评估横向剪切波前传感器曲率检测的稳定性, 分析应力检测

误差, 在无电流的条件下, 采用厚度为 0.523 mm 的硅基底进行 2 h 的曲率半径测量, 其铸层厚度为 49  $\mu\text{m}$ , 波前传感器到基底表面的距离  $L$  为 80 mm。激光波前相差分布结果如图 11 所示, 由相差分布图可知, 基底表面上凸起, 中间区域相位值最大。图 12 为相差分布图轮廓, 经拟合得其曲率半径为 1297 mm, 根据公式(3)计算得到, 基底弯曲曲率半径为 2754 mm。基底弯曲曲率半径在 2 h 内波动值如

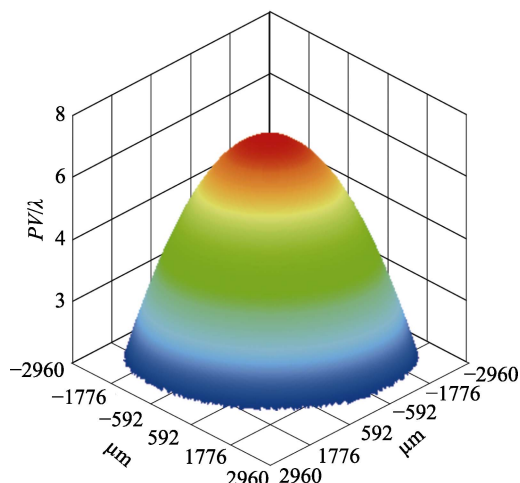


图 11 基底反射激光波前相差分布图

Fig.11 Distribution diagram of wave front phase difference of reflected laser from base

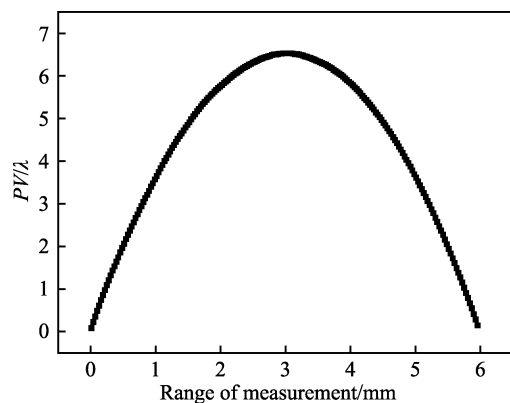


图 12 基底反射激光波前相差分布轮廓图

Fig.12 Profile of wave front phase difference of reflected laser from base

图 13 所示, 其曲率测量最大误差为 44 mm, 误差占比为 1.5%。将曲率测量误差带入 Stoney 公式计算得出, 应力测量误差为 1.3 MPa。相比于 Shack-Hartmann 波前传感器<sup>[11]</sup>, 采用横向剪切波前传感器测量铸层应力, 具有更高的检测精度及测量范围。

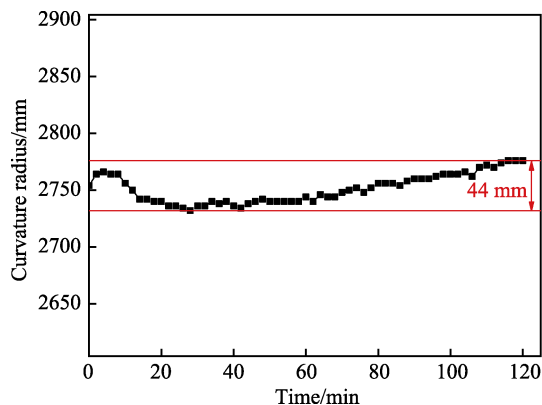


图 13 基底曲率半径变化图

Fig.13 Variation diagram of curvature radius difference of base

## 2.4 铸层平均应力与铸层厚度的关系

在铸层应力作用下, 基底发生弯曲变形, 当沿基底不同方向的铸层应力大小不相等时, 其弯曲程度将会出现差异。图 14 为激光相差分布随铸层厚度变化的俯视图, 沿基底长度方向为  $Y$  方向, 宽度方向为  $X$  方向。当铸层厚度为 10  $\mu\text{m}$  和 20  $\mu\text{m}$  时, 激光相差分布俯视图为椭圆, 表明基底在  $Y$  方向的弯曲程度比  $X$  方向大。当铸层厚度为 30  $\mu\text{m}$  时, 激光相差分布俯视图由椭圆转变为圆形, 即基底  $Y$  方向与  $X$  方向弯曲程度相当。这是由于基底不同方向的铸层应力大小与基底尺寸有关, 长度方向的弯曲程度明显大于宽度方向<sup>[15]</sup>, 当铸层较薄时, 铸层平均应力及铸层对基底施加的合力较小, 基底形状对铸层应力的影响起主导作用, 同时, 硅片装夹时对基底施加的外力及沉积层的均匀性也是影响铸层应力大小的因素, 因此铸层应力在  $X$  方向与  $Y$  方向出现不等的情况。当铸层厚度和铸层平均应力增加后, 基底形状等外部因素对铸层应力的影响逐渐减小, 因此  $X$  方向与  $Y$  方向弯曲程度逐渐相当。

铸层平均应力随铸层厚度增加的变化情况如图 15 所示。由检测结果可知, 在 0.5  $\text{A}/\text{dm}^2$  电流密度下,

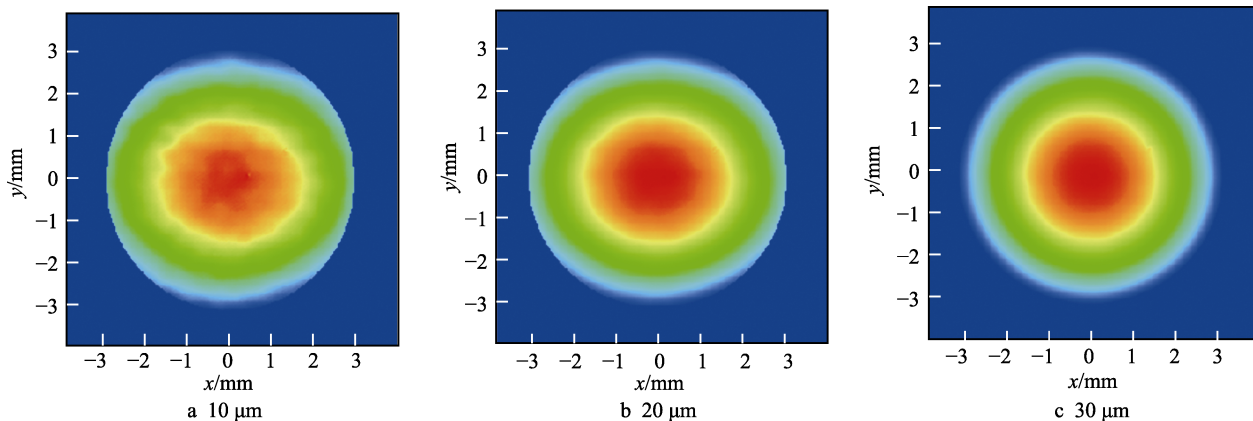


图 14 反射激光相差分布变化俯视图

Fig.14 Planform for phase difference distribution of reflected laser

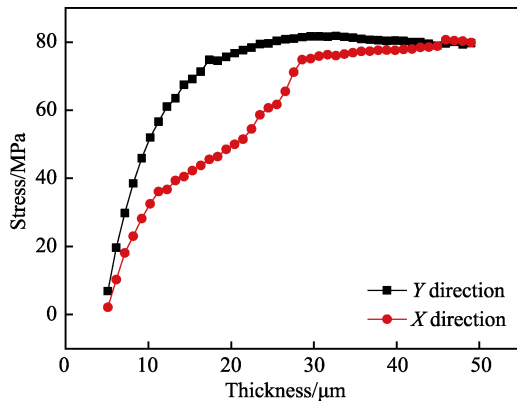


图 15  $0.5 \text{ A/dm}^2$  电流密度下铸层平均应力与铸层厚度的关系

Fig.15 Relationship between average stress and thickness of electroforming layer under  $0.5 \text{ A/dm}^2$

铸层应力为拉应力。在  $5\sim 30 \mu\text{m}$  厚度范围内, 铸层平均应力随铸层厚度的增加, 整体呈上升趋势。铸层厚度小于  $20 \mu\text{m}$  时,  $Y$  方向应力及应力增长速率均大于  $X$  方向。铸层厚度大于  $20 \mu\text{m}$  后,  $Y$  方向应力大于  $X$  方向应力,  $X$  方向应力增长速率较大。当铸层厚度达到  $30 \mu\text{m}$  时,  $X$  方向与  $Y$  方向应力均逐渐趋于稳定。直至铸层厚度为  $45 \mu\text{m}$  时, 两个方向的铸层平均应力基本相等, 根据 Stoney 公式计算得到, 此时铸层平均应力为  $79.7 \text{ MPa}$ 。铸层平均应力随铸层厚度变化的规律, 由铸层形成过程中微观结构组织主导, 晶体生长过程中, 晶格参数的变化导致了内应力的产生<sup>[16]</sup>。在金属电沉积结晶生长的过程中, 晶粒越细小, 沉积层晶格数目越多, 改变晶格参数的倾向越大, 晶格间的错配、空缺、平移等缺陷增多, 导致沉积层应力的产生。在晶粒生长模式及晶粒形核速率的影响下, 晶粒尺寸随铸层厚度增加而不断减小, 新沉积层的晶格大小与原沉积层晶格大小不匹配<sup>[17]</sup>。因此, 铸层平均应力随铸层厚度的增加而变大, 当铸层厚度达到  $30 \mu\text{m}$  左右, 晶格大小减小到临界值, 铸层平均应力趋于稳定。

### 3 结论

1) 横向剪切波前传感器测量光滑表面曲率半径时, 具有较高的测量精度, 可达  $99.22\%$ 。

2) 电铸应力实时检测的灵敏度有限, 基底越薄, 检测灵敏度越高, 可测铸层极限厚度越小。横向剪切波前传感器曲率半径测量的最大曲率半径为  $333.6 \text{ m}$ , 当单面抛光硅基底厚度为  $0.532 \text{ mm}$ , 电流密度为  $0.5 \text{ A/dm}^2$  时, 最小极限厚度约为  $5.1 \mu\text{m}$ 。

3) 在外部环境 (如光源变化及电铸液流动等因素) 的影响下, 横向剪切波前传感器对基底曲率半径测量的波动误差为  $44 \text{ mm}$ , 应力测量误差为  $1.3 \text{ MPa}$ 。

4) 在  $0.5 \text{ A/dm}^2$  电流密度下, 镍层平均应力随铸

层厚度的增加而逐渐增大, 当铸层厚度达到  $30 \mu\text{m}$  时, 铸层平均应力大小趋于稳定。

### 参考文献:

- [1] 翁灿, 王飞, 杨冬娇, 等. 电流密度对微/纳结构电铸成型模芯质量的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(10): 52-58.  
WENG Can, WANG Fei, YANG Dong-jiao, et al. Effect of current density on quality of electroformed mold inserts with micro/nano-cavities[J]. Journal of materials engineering, 2017, 45(10): 52-58.
- [2] MCGEOUGH J A, LEU M C, RAJURKAR K P, et al. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing[J]. CIRP annals, 2001, 50(2): 499-514.
- [3] 强军, 蒋炳炎, 董彦灼, 等. 钴含量对电铸镍钴合金模芯微纳结构复制质量的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 124-130.  
QIANG Jun, JIANG Bing-yan, DONG Yan-zhuo, et al. Effects of cobalt content on replication quality for micro/nano-structural morphology of electroformed nickel cobalt alloy mold insert[J]. China surface engineering, 2018, 31(5): 124-130.
- [4] 董彦灼, 蒋炳炎, 强军. 模芯钴含量对仿荷叶 PDMS 制件表面疏水性的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 196-202.  
DONG Yan-zhuo, JIANG Bing-yan, QIANG Jun. Effects of mass fraction of cobalt in mold inserts on the hydrophobicity of mimic lotus leaf PDMS parts[J]. Surface technology, 2019, 48(4): 196-202.
- [5] 杜立群, 陶友胜, 李爱琪, 等. 基于电化学沉积的高深宽比无源 MEMS 惯性开关的研制[J]. 航空制造技术, 2017, 533(14): 24-29.  
DU Li-qun, TAO You-sheng, LI Yuan-qi, et al. Development of high-aspect ratio passive MEMS inertial switch based on electrochemical deposition technique[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2017, 533(14): 24-29.
- [6] MCGEOUGH J A, LEU M C, RAJURKAR K P, et al. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing[J]. CIRP annals, 2001, 50(2): 499-514.
- [7] 雷卫宁, 朱荻. 纳米晶精密电铸层微观结构的测试与研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(14): 1283-1286.  
LEI Wei-ning, ZHU Di. Research on microstructure of nanocrystalline nickel electroforming layers[J]. China mechanical engineering, 2004, 15(14): 1283-1286.
- [8] 钱劲, 刘激, 张大成, 等. 微电子机械系统中的残余应力问题[J]. 机械强度, 2001, 23(4): 393-401.  
QIAN Jin, LIU Cheng, ZHANG Da-cheng, et al. Residual stresses in micro-electro-mechanical systems[J]. Journal of mechanical strength, 2001, 23(4): 393-401.
- [9] BENRAKKAD M S, BENITEZ M A, ESTEVE J, et al. Stress measurement by microRaman spectroscopy of polycrystalline silicon structures[J]. Journal of micromechanics & microengineering, 1995, 5(2): 132-135.

(下转第 377 页)

- methodology[J]. *Surface technology*, 2016(1): 148-154.
- [20] SUBRAMANIAN M, SAKTHIVEL M, SUDHAKARAN R. Modeling and analysis of surface roughness of Al7075-T6 in end milling process using response surface methodology[J]. *Arabian journal for science & engineering*, 2014, 39(10): 7299-7313.
- [21] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
- DENG Ju-long. Basic method of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.
- [22] 李聪波, 肖溱鸽, 李丽, 等. 基于田口法和响应面法的数控铣削工艺参数能效优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(12): 3182-3191.
- LI Cong-bo, XIAO Qin-ge, LI Li, et al. Optimization method of NC milling parameters for energy efficiency based on Taguchi and RSM[J]. *Computer integrated manufacturing systems*, 2015, 21(12): 3182-3191.
- [23] 辛民, 王西彬, 解丽静, 等. 基于灰色理论的铣削参数优化方法研究[J]. *中国机械工程*, 2009(23): 39-42.
- XIN Min, WANG Xi-bin, XIE Li-jing, et al. Research on optimization method of milling parameters based on grey theory[J]. *China mechanical engineering*, 2009(23): 39-42.
- [24] PIEPEL G F. Quality control, robust design, and the Taguchi method[M]. Heidelberg: Springer, 1989.
- [25] 邓朝晖, 符亚辉, 万林林, 等. 面向绿色高效制造的铣削工艺参数多目标优化[J]. *中国机械工程*, 2017(19): 2365-2372.
- DENG Zhao-hui, FU Ya-hui, WANG Lin-lin, et al. Multi objective optimization of milling process parameters for green high-performance manufacturing[J]. *China mechanical engineering*, 2017(19): 2365-2372.

(上接第 338 页)

- [15] CHEN Q A, LIU X H. FEM analysis of partial flash processing for a plate[J]. *AIP conference proceedings*, 2013, 1532(1): 1085.
- [16] 樊新民, 黄洁雯. 结构钢热处理技术数据手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- FAN Xin-min, HUANG Jie-wen. Data manual of heat treatment technology for structural steel[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [17] 陈庆安, 彭文, 卢日环, 等. 厚钢板瞬时淬火淬硬层深度预测[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(14): 214-216.
- CHEN Qing-an, PENG Wen, LU Ri-huan, et al. Predicting for hardened depth of thick steel plate flash processing[J]. *Hot working technology*, 2015, 44(14): 214-216.
- [18] 刘方强, 林晨, 陶洪伟, 等. 加热时间对高频感应熔覆 Ni45B 合金涂层的影响[J]. *表面技术*, 2013, 42(1): 14-16.
- LIU Fang-qiang, LIN Chen, TAO Hong-wei, et al. The effect of heating time on the high-frequency induction clad Ni45B alloy coating[J]. *Surface technology*, 2013, 42(1): 14-16.
- [19] 高长刚, 孙维连, 孙铂, 等. 高频淬火加热时间对钢管表面组织和性能的影响[J]. *表面技术*, 2017, 46(1): 141-145.
- GAO Chang-gang, SUN Wei-lian, SUN Bo, et al. Effect of high frequency quenching heating time on surface microstructure and properties of steel tube[J]. *Surface technology*, 2017, 46(1): 141-145.

(上接第 363 页)

- [10] BICKER M, VON-HULSEN U, LAUDAHN U, et al. Optical deflection setup for stress measurements in thin films[J]. 1998, 69(2): 460-462.
- [11] KUME T, EGAWA S, MIMURA H. Development of internal stress measurement technique for Ni electroforming using Shack. Hartmann sensor[J]. *International journal of electrical machining*, 2016, 21: 25-30.
- [12] 许晓军, 陆启生, 刘泽金. 剪切干涉仪与哈特曼波前传感器的波前复原比较[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(3): 269-272.
- XU Xiao-jun, LU Qi-sheng, LIU Ze-jin. Comparison of wavefront reconstruction by lateral shear interferometer and hartman wavefront sensor[J]. *High power laser and particle beams*, 2000, 12(3): 269-272.
- [13] STONEY G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1909, 553: 172-175.
- [14] HEARNE S J, FLORO J A. Mechanisms inducing compressive stress during electrodeposition of Ni[J]. *Journal of applied physics*, 2005, 97(1): 014901.
- [15] YU Y T, YUAN W Z, QIAO D Y. Effects of imperfections on bifurcation of multi-layer microstructures of MEMS under thermal loading[J]. *Key engineering materials*, 2007, 339: 276-280.
- [16] 宋磊. 微电铸层内应力与微模具型芯制作的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- SONG Lei. Study on stress in micro electrodeposited coating and fabrication of micro mould insert[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [17] 乔俊强, 虎学梅. 电沉积纳米晶镍镀层微结构的调控及其对力学性能的影响[J]. *材料保护*, 2018, 51(9): 66-72.
- QIAO Jun-qiang, HU Xue-mei. Microstructure regulation and its effect on the mechanical properties of electrodeposited nanocrystalline nickel coatings[J]. *Materials protection*, 2018, 51(9): 66-72.