

文章编号: 1004-0609(2006)01-0130-06

转动结构在精密铜合金板带残余应力检测中的应用和分析^①

张旦闻^{1, 2}, 刘宏昭¹, 路俊攀³, 刘平²

(1. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710049;

2. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471039;

3. 洛阳铜加工集团公司 质量检测中心, 洛阳 471000)

摘 要: 提出一种转动结构检测精密铜合金板带残余应力的方法, 应用有限元法作了结构分析和优化, 并利用梁弯曲产生的已知残余应力分布对转动结构的测试结果进行了验证, 两者吻合较好。结果表明, 转动结构的灵敏度为 $0.48 \mu\text{m}/10^{-6}$, EDM 批量加工后, 灵敏度的误差小于 4.2%。应用该方法对 C194 铜合金板带 ($600 \text{ mm} \times 230 \mu\text{m}$) 的轧向残余应力进行测试, 结果表明: 在距板带中心 200 mm 范围内呈现小幅波动 ($27.4 \pm 3.3 \text{ MPa}$), 在边缘处变为压应力, 检测结果与实际板形分析结果相吻合。与常规残余应力检测方法相比, 采用转动结构更加精确和便捷, 并提高了检测效率。

关键词: 残余应力; 转动结构; 铜合金板带

中图分类号: TG 115.2; TG 145.2

文献标识码: A

Applications and analyses of rotating structure in residual stress measurement on high accurate copper alloy strip

ZHANG Dan-wen^{1, 2}, LIU Hong-zhao¹, LU Jun-pan³, LIU Ping²

(1. Department of Mechanical Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710049, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology,
Luoyang 471039, China;

3. Quality Testing Center, Luoyang Copper (Group) Co. Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: A rotating structure for residual stress measurement in thin cold-rolled strip of copper alloy was introduced. The measurement sensitivity of the rotating structures was analyzed and optimized by finite element method (FEM). A experimental validation of the rotating structure was carried out on a plastically bent beam with known residual stress distribution, and as a consequence, the results are well consistent with results from FEM. The average sensitivity of the structures manufactured by EDM is $0.48 \mu\text{m}/10^{-6}$ and its deflection is less than 4.2%. The measurement results on C194 strip ($600 \text{ mm} \times 230 \mu\text{m}$) indicate that there exist tensile residual stresses ($27.4 \pm 3.3 \text{ MPa}$) in the area of 200 mm away from strip center and compressive in strip edges. The rotating structure has the unique advantage of high resolution and easy performance compared with common techniques.

Key words: residual stress; rotating structure; copper alloy strip

铜合金板带内部的残余应力源自加工过程中的不均匀塑性变形, 其大小和分布对板形有重要的影

响。在集成电路引线框架的高速冲载过程中, 残余应力会对模具刃口造成受力不均和扭曲, 严重影响

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA331110)

收稿日期: 2005-01-31; 修订日期: 2005-09-26

作者简介: 张旦闻(1962-), 男, 副教授, 博士研究生

通讯作者: 刘宏昭, 教授; 电话: 029-82312451; E-mail: liuhongzhao@xaut.edu.cn

产品质量和生产效率。通过有针对性的调整轧制和矫直工艺参数^[1, 2], 可有效地消除或减少板带中的残余应力, 提高板形质量。因此, 研究更加有效的残余应力测试方法具有重要的实际意义。

米谷茂^[3]介绍了薄板残余应力测量的基本理论和方法。Kiuchi^[4]在进一步的研究中指出在残余应力释放所引起的变形中对试样纵向宏观位移测量的重要性。通常这种位移量很小, 钻孔法测量难度大且效率低, 而采用 X 射线法具有局限性^[5, 6]。Goosen 等^[7]和 Zhang 等^[8]提出的转动微结构法测量面内位移法具有灵敏度高和结构简单等特点, 在薄膜力学测试领域得到广泛关注^[9]。在 Michael^[6]的裂纹柔度法中, 利用线切割手段释放试样中的残余应力, 结合有限元的分析计算方法, 极大地提高了残余应力的检测精度和效率。

本文作者针对 Goosen 等^[7]和 Zhang 等^[8]提出的转动微结构测量面内位移的方法作了分析和改进, 结合 Prime^[6]的应力释放测量方法, 提出了精密铜合金板带轧向残余应力的新检测方法, 采用有限元法进行了分析和优化, 并通过实验验证了该方法的可靠性。

1 试样条件

选用工厂提供的 C194 精密铜合金板带, 工艺过程为: 热轧 → 双面铣 → 冷轧(加工率为 50%) → 切边 → 退火 → 精轧(加工率为 20%) → 矫直。板带宽度为 600 mm, 厚度为 230 μm。

经轧制后的铜合金板带会出现轧制织构, 晶粒取向统计分布具有正交对称性, 其力学性能呈现明显的各向异性特征^[10-12]。用电子拉伸试验机(型号: ZWACK/Z100; 引伸计: LE25 mm)测量轧向和横向的平均弹性模量分别为 $E_x = 138 \text{ GPa}$ 、 $E_y = 120 \text{ GPa}$ 。

1.1 板带残余应力测量原理

根据文献[3, 13]所介绍的方法将板带沿轧制方向腐蚀成栅条状试样后, 残余应力释放所引起的变形如图 1 所示。

图 1 中的 Δl 为轧向残余应力(α)释放所引起的栅条沿 x 方向的变形量; Δy 为 α_x 沿栅条厚度不对称分布引起的弯曲挠度。

残余应力的计算公式为^[4]

$$\sigma = \pm E \left[\frac{t \cdot \Delta y}{l^2} + \frac{\Delta l}{l} \right] \quad (1)$$

式中 E 为弹性模量; t 为板带厚度; l 是栅条原始长度。

1.2 转动结构测量原理

试样制作成对单向应变敏感的转动结构具有将位移或变形放大的功能, 可测量残余应力释放所引起的微小变形。图 2 所示为转动结构的示意图。图 2(b) 为转动臂变形的局部视图。固定臂随残余应力释放可伸缩变形, 转动臂有两个细长的颈($b \times a$), 分别与固定臂和基体相连, 两颈不共线有一个偏离量 h 。这样, 当残余应力释放时, 固定臂沿 x 方向伸缩变形导致转动臂旋转, 通过测量转动臂顶部的

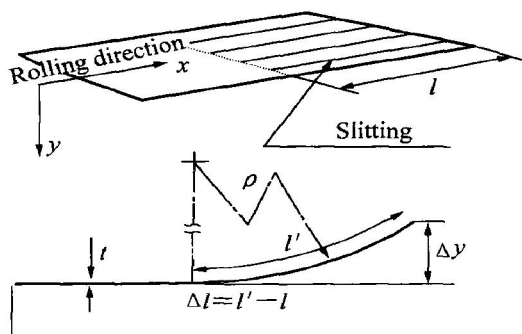


图 1 残余应力释放所引起的变形及测量项目

Fig. 1 Deformation caused by residual stresses releasing and corresponding measuring items

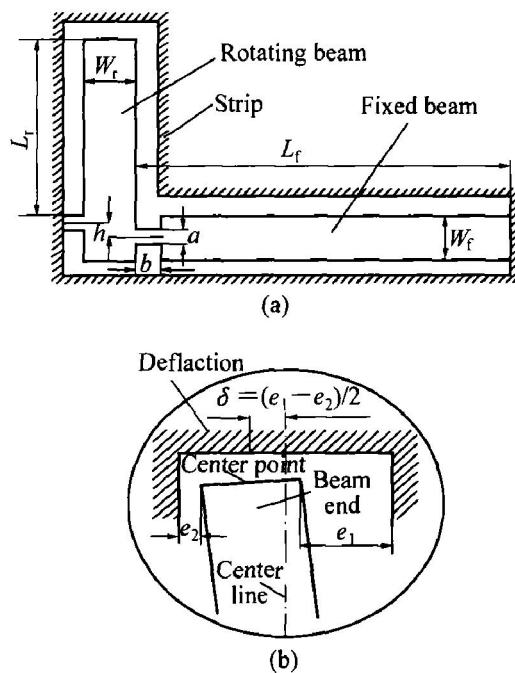


图 2 纵向结构及转动臂的偏移量 δ 的测量示意图

Fig. 2 Schematic illustrations of rotate structure overall view (a) and enlarged part (b)

偏移量(δ)计算实际的残余应力。

1.3 转动结构的有限元分析

采用 ANSYS 有限元分析软件, 采用 8 节点平面应变单元 Plane82, 材料为各向异性($E_x = 138$ GPa, $E_y = 120$ GPa, $G_{xy} = 45.5$ GPa, $\mu = 0.33$)。对颈部区域的网格间距为 10 μm , 其他部分稀疏。沿固定臂纵向加载以模拟板带中轧向残余应力, 提取转动臂顶部 x 方向的偏移量 δ 以及固定臂应变 ϵ 的计算结果。

图 3 所示为不同参数下偏转量 δ 与应变 ϵ 的有限元模拟计算结果。偏转量 δ 可表示为^[8]

$$\delta = f_x \epsilon \quad (2)$$

残余应力的计算公式为

$$\sigma = (E_x \cdot \delta) / f_x \quad (3)$$

式中 δ 是转动臂端部的偏移量, μm ; σ 为残余应力, MPa; ϵ 为应变, 10^{-6} ; f_x 为测量灵敏系数(即为图 3 中直线的斜率), $\mu\text{m} / 10^{-6}$ 。

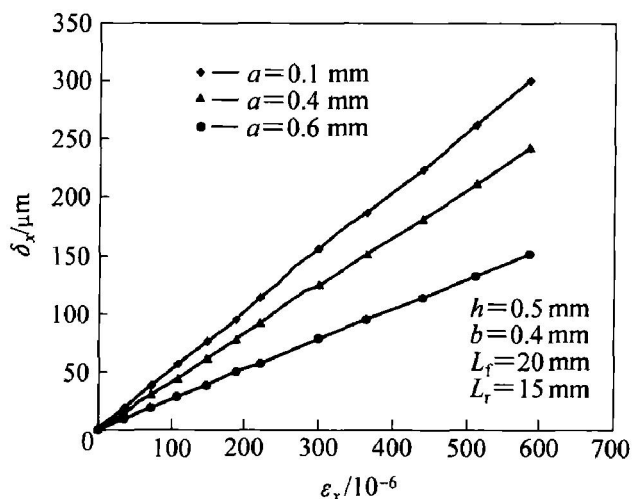


图 3 转动结构的偏转量随残余应变的变化曲线

Fig. 3 Change of rotate beam deflection (δ) with residual strain (ϵ) from FEM result

图 4 所示为 f_x 随参数 L_r , L_f , W_r , W_f , h 和 b 变化的计算结果。由图 4(a) 和(b) 可以看出, 当残余应力一定, f_x 与 L_r , L_f 呈线性变化; 当 ϵ 变大时, 作用在转动臂上的力矩也变大, 偏移量 δ 也随之增大, 并在一定偏移范围内, 偏移量与转动臂长度成正比。

由图 4(c) 和(d) 可以看出, 选择较小的 W_r 和 W_f 可以得到较高的测量灵敏度, 但考虑到整个结构抗干扰能力, 较大的 W_r 和 W_f 可以使转动结构

更稳定, 保持试样平整以方便测量。为了简化分析, 本研究取 $W_f = 2.5$ mm, $W_r = 1.5$ mm。

转动臂的转动力矩是通过颈传递得到的, 因此, 参数 a , h 对 f_x 的影响较大, 如图 4(a) 和(b) 所示。当 W_r 和 W_f 一定时, 灵敏度 f_x 随 a 的增加而减小, 颈宽越小, 灵敏度越高。

如果将转动臂与颈断开, 固定臂中的残余应力将得到充分释放, 颈将随固定臂均匀伸长和收缩, 但由于颈与转动臂之间的联系, 颈截面受转动臂的约束而发生弯曲, 颈宽 a 越大, 约束就越强烈, 便有较小的 a 获得高灵敏度 f_x 的变化规律。

图 4(e) 所示为 f_x 随 h 的变化规律。当 h 为 0~0.7 mm, f_x 随 h 的增加达到最大值; 当 h 继续增加时, 灵敏度随之下降。出现这种变化规律是由于转动臂的驱动力矩源自固定臂的伸长变形, 各构件之间要保持变形协调关系的缘故。与之相反, 颈长 b 对 f_x 的影响可以忽略不计, 如图 4(f) 所示。当 $0.1 \leq b \leq 0.5$, f_x 的变化不大于 3%。以上规律与文献[8]相一致。

由于到精密铜合金板带的轧向残余应力值不大 (< 100 MPa), 在保证转动结构制作工艺的前提下, 使之保持最大的测量灵敏度。本研究选用的转动结构参数为: $a = 0.2$ mm, $h = 0.5$ mm, $L_r = 15$ mm, $L_f = 20$ mm, $W_r = 1.5$ mm, $W_f = 2.5$ mm, $b = 0.4$ mm; 测量灵敏度系数 $f_x = 0.48 \mu\text{m} / 10^{-6}$ 。

2 实验

沿板带横向不同位置截取 30 mm $\times$ 40 mm 的试样, 并将其分两组叠放装夹固定, 用瑞士产 BAE-800W 数控线切割机床加工出转动结构, 钼丝直径为 0.25 mm。用万能工具显微镜测量各组结构尺寸及偏转量 δ , 利用有限元软件计算每组试样的灵敏度系数 f_x 。

根据文献[4, 14] 介绍的直接测量法, 在同一母材上沿轧制方向腐蚀制成 2 mm $\times$ 230 μm $\times$ 100 mm 的栅条(见图 1), 用工具显微镜测量栅条的伸长量(ΔL_{100})。

转动结构对已知应力场的验证实验如图 5 所示。选用矩形梁在 AG25T-A 电子拉伸实验机上作四点弯曲, 梁发生弹塑性弯曲变形, 卸载后在梁的 x - y 平面形成已知的残余应力分布(见图 5)。对梁内部残余应力的 FEM 计算结果如图 6 所示。材料选用 45 钢, $E = 198$ GPa, $\sigma_s = 270$ MPa, $\sigma_b = 300$

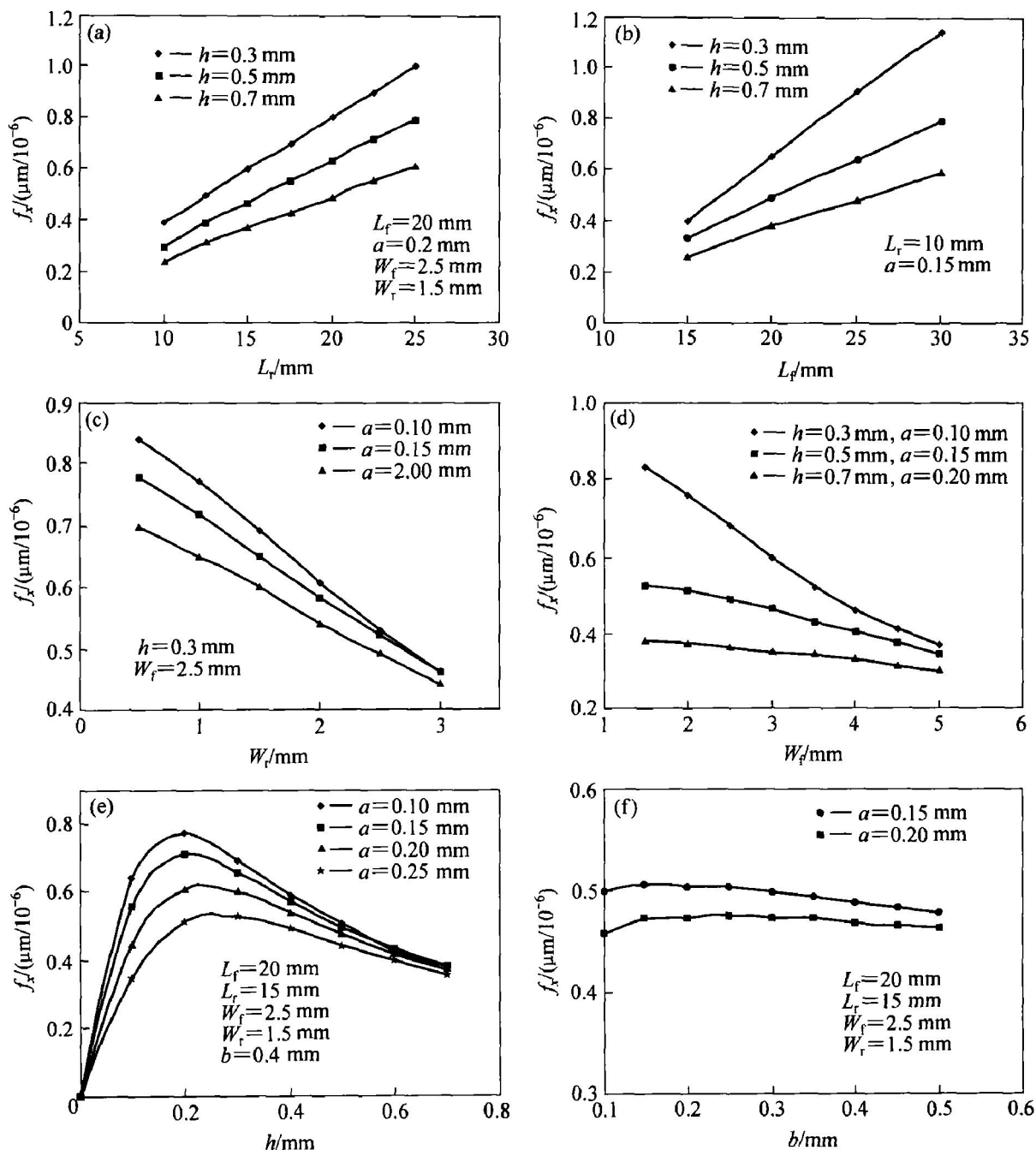
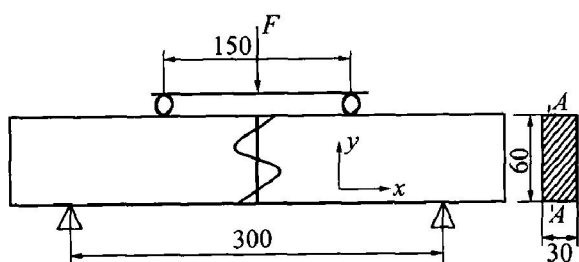
图4 纵向结构中 f_x 随参数 L_r , L_f , W_r , W_f , h , b 的变化曲线Fig. 4 Change curves of f_x with parameters L_r (a), L_f (b), W_r (c), W_f (d), h (e) and b (f) in vertical structure

图5 矩形梁弯曲的实验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bend beam test (mm)

MPa。沿 A—A 剖面(见图 5)用线切割加工出厚度为 0.5 mm 的 60 mm × 30 mm 测试试样, 然后制作出相同参数的转动结构并测量转动臂的偏转量 δ 。

3 结果和讨论

3.1 线切割加工实验方式对残余应力测量的影响

在释放残余应力过程中, 机械方法(如锯切, 铣削, 钻孔等)加工会产生较大的加工应力, 化学腐蚀效率太低。而用线切割加工可避免加工应力的

产生,提高加工精度和效率。根据试样测量值计算的转动结构灵敏度系数 $f_x = (0.46 \pm 0.01) \mu\text{m}/10^{-6}$,与理论值 $(0.48 \mu\text{m}/10^{-6})$ 的误差小于 4.2%。说明用线切割加工试样时所造成尺寸差异对灵敏度系数的影响较小。实验中发现将试样叠放加工时,冷却和散热条件的差异会造成温度不均匀分布,引起试样变形和电化学腐蚀速度的改变造成误差。减小叠放层数对加工误差有较明显的抑制作用,可满足更高测量精度的要求。

3.2 对已知应力场的验证实验

图 6 所示为转动结构对已知应力场的验证结果,与有限元计算结果特别在低应力区非常吻合。实验表明本文对转动结构的分析计算方法是准确可靠的。

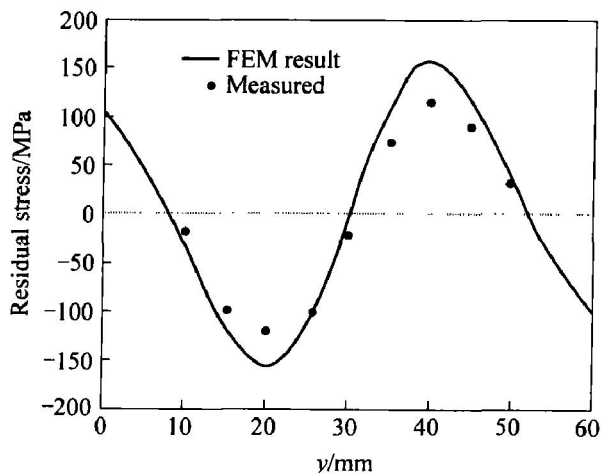


图 6 转动结构对弯曲梁的残余应力测量结果
Fig. 6 Test results of residual stress from rotating structure method on bend beam

3.3 精密铜合金板带中的轧向残余应力

在薄板冷轧过程中,受诸多因素影响,带材在辊缝中的轧向延伸沿板带横向分布常常是不均匀的,这种不均匀延伸的结果导致轧后带材的轧向残余应力沿板带横向的不均匀分布,出现这种情况不仅严重影响板带的板形,而且也后续深加工质量产生影响。

C194 板带轧向残余应力沿带宽分布的测量结果如表 1 所列。对同批次板带用两种方法测量得到的轧向残余应力的变化规律基本一致,两种方法得到的残余应力最大偏差为 $\pm 2 \text{ MPa}$ 。由表 1 可以看出,板带中部的残余应力为拉应力,在距板带中心 0~200 mm 范围内小幅波动 $(27.4 \pm 3.3) \text{ MPa}$,在板带边缘处转变为压应力。根据以上应力的特征,

当边缘压应力超过一定临界值时,板带将屈曲变形(即产生边浪和翘曲)^[15]。对表 1 作插值计算得到板带边缘的压应力沿板带横向分布范围 $d_w \approx 40 \text{ mm}$,根据文献[15]的计算结果,板带发生局部浪形的屈曲临界应变偏差值约为 $15\text{I}(150\mu\epsilon)$,对应的临界压应力为 21 MPa 。依据表 1 的测量数据,可通过调整板形控制曲线或冷却方式达到理想板形^[13, 16]。板带中部的应力波动反映板形误差中的高次项,可作为分段冷却控制板形的依据^[13]。实际生产情况也证实了上述分析。

表 1 转动结构法与直接测量^[4]实验结果的对比

Table 1 Comparison of residual stress results by rotating structure method and direct test method on copper alloy strip

Distance from center/mm	σ_x by direct test method ^[4, 13] /MPa	σ_x by rotating structure method/MPa	
0	25.4	27.5	22.5
40	30.0	23.4	24.2
80	33.6	30.3	26.7
120	28.5	23.5	26.5
140	34.5	30.2	28.1
200	33.6	35.2	30.5
240	19.0	18.9	15.8
280	-15.0	-18.6	-10.3

综上所述,用转动结构可准确、方便地测量精密铜合金板带残余应力,在板带轧制过程中为板形控制提供重要依据。在后续的引线框架的冲载加工过程中,母材的残余应力分布规律对后续产品质量也有着重要影响。

4 结论

1) 根据 Zhang 等^[8]所提出的转动结构测量原理,提出了用于精密铜合金板带残余应力测量的转动结构,可测量板带轧向残余应力及其分布,具有较高的测量精度,对转动结构的测试结果进行验证,结果表明本文对转动结构的分析计算是可行的。

2) 采用有限元法分析和计算了各结构参数对测量灵敏度的影响,发现 h , a 对测量灵敏度有很大影响,通过结构优化,制定的转动结构参数为: $a=0.2 \text{ mm}$, $h=0.5 \text{ mm}$, $L_r=15 \text{ mm}$, $L_t=20 \text{ mm}$,

$W_r = 1.5 \text{ mm}$, $W_t = 2.5 \text{ mm}$, $b = 0.4 \text{ mm}$, 对 C194 板带应变测量灵敏度为 $0.48 \mu\text{m}/10^{-6}$ 。

3) 采用线切割加工效率高、尺寸统一、灵敏度误差小。在普通工具显微镜上可获得明确的直线轮廓,提高了测量精度和测量效率。

REFERENCES

- [1] Mitani Y. Discussion of method of reducing internal residual stress in tension lever [J]. Journal of the JCBRA, 1999, 38: 190 - 194.
- [2] 柯映林, 董辉跃. 7075 铝合金厚板预拉伸模拟分析及其在淬火残余应力消除中的应用 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(4): 639 - 645.
HE Ying-lin, DONG Hui-yue. Pre-stretching process and its application in reducing residual stress of quenched 7075 aluminum alloy thick plates [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4): 639 - 645.
- [3] 米谷茂. 残余应力的产生和对策 [M]. 朱荆璞, 邵会孟, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983. 210 - 214.
Yoneya G. The Production and Countermeasure of Residual Stress [M]. ZHU Jing-pu, SHAO Hui-meng, transl. Beijing: China Machine Press, 1983. 210 - 214.
- [4] Kiuchi M. Theory and measurement of residual stress in sheets, bars and tubes [J]. Journal of the Japan Copper and Brass Research Association, 2000, 39(1): 30 - 36.
- [5] 周长林, 陈中兴, 袁柳梅, 等. 钢带的板形与内应力关系研究 [J]. 上海钢研, 1998(6): 24 - 27.
ZHOU Chang-lin, CHEN Zhong-xing, YUAN Liu-mei, et al. Effect of internal stress on shape of strip [J]. Shanghai Steel Research, 1998(6): 24 - 27.
- [6] Prime M B. Residual stress measurement by successive extension of a slot: The crack compliance method [J]. Applied Mechanics Reviews, 1999, 52(2): 75 - 96.
- [7] Goosen J F L, Driehhuizen B P. Stress measurement structures for micromachined sensors [A]. Proc 7th Int Conf on Solid-state Sensors and Actuators [C]. Yokohama: IEEE, 1993. 783 - 786.
- [8] Zhang X, Zhang T Y, Zohar Y. Measurements of residual stresses in films using micro-rotating structures [J]. Thin Solid Films, 1998, 335: 97 - 105.
- [9] 陈隆庆, 赵明喈, 张统一. 薄膜的力学测试技术 [J]. 机械强度, 2001, 23: 413 - 429.
CHEN Long-qing, ZHAO Ming-hao, ZHANG Tong-yi. The testing method of mechanical properties of thin films [J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23: 413 - 429.
- [10] 刘毓舒. 织构材料 X 射线分析的线性方程组 [J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(2): 135 - 138.
LIU Yu-shu. Simultaneous linear equations of X-ray stress analysis for textured materials [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1999, 33(2): 135 - 138.
- [11] 赵冬梅, 董企铭, 刘平, 等. 高强高导铜合金合金化机理 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S2): 21 - 25.
ZHAO Dong-mei, DONG Qi-ming, LIU Ping, et al. Mechanism of alloying of copper alloy with high strength and high electrical conductivity [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(S2): 21 - 25.
- [12] 张旦闻, 赵冬梅, 刘宏昭, 等. Cu-Ni-Si 合金二次时效时的再结晶行为 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(7): 1241 - 1246.
ZHANG Dan-wen, ZHAO Dong-mei, LIU Hong-zhao, et al. Recrystallization behavior of Cu-Ni-Si alloy during two-step aging [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(7): 1241 - 1246.
- [13] 林振波, 段振勇, 连家创, 等. 冷轧机板形标准曲线的分析及选择方法 [J]. 钢铁研究学报, 1997, 9(3): 55 - 58.
LIN Zheng-bo, DUAN Zheng-yong, LIAN Jia-chuang, et al. Analysis on shape standard curve of cold rolling mill and its selection [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1997, 9(3): 55 - 58.
- [14] Mitani Y. Members of board and strip group. The measurement method for slit strain of copper and copper alloy strip [J]. Journal of the Japan Copper and Brass Research Association, 2000, 39(1): 37 - 44.
- [15] 卿伟杰, 杨荃. 冷轧带钢整体和局部屈曲及后屈曲的有限元分析 [J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(4): 377 - 380.
JI Wei-jie, YANG Quan. Study on cold rolled strip global and local buckling, post-buckling using the finite element method [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2000, 22(4): 377 - 380.
- [16] 胡国栋, 孙登月, 许石民, 等. 冷轧带材前张力分布、横向厚度与板形关系 [J]. 钢铁, 1998, 33(12): 62 - 65.
HU Guo-dong, SUN Deng-yue, XU Shi-min, et al. Relationship among sheet shape, out-tension and sheet thickness distribution in width in cold rolling [J]. Iron and Steel, 1998, 33(12): 62 - 65.

(编辑 李艳红)