

圆锯片辊压适张后应力分布的有限元分析¹⁾

边柯柯* 赵东* 胡诗宇†

*(北京林业大学工学院, 北京 100083)

†(北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083)

摘要 分析了圆锯片辊压适张后的应力分布, 并与国产圆锯片辊压适张后 X 射线衍射法的实验结果进行了对比. 考虑到特定辊压工艺和不同锯片材质对适张效果的影响, 以弹性力学中接触理论为基础, 应用 ANSYS 软件的塑性分析法, 建立了适张后应力状态的弹塑性分析模型. 该模型引入影响辊压适张度的主要因素: 锯片基材塑性应力应变关系, 辊轮结构、转速, 以及辊压载荷、位置和次数, 结果表明应力分布的有限元计算结果与实验结果比较一致.

关键词 圆锯片, 辊压适张, 有限元法

圆锯片在高速回转切削过程中, 由于沿径向温度梯度太高, 外边缘切向压应力值过大, 将出现失稳, 即边缘压曲现象^[1]. 要消除边缘压曲现象, 目前最有效的方法是辊压适张.

辊压适张是在圆锯片平面装夹部和齿部之间, 通过机械加工方法使锯片局部产生足够的弹塑性变形, 从而在锯片体内引入适张应力, 以补偿锯片切削时产生的不利于锯片稳定的热应力, 并使锯片的有齿周边张紧, 以提高锯片的横向刚度和动态稳定性^[2,3]. 理想适张应力分布的主要特点为: 靠锯齿的外环区要有足够的切向张应力^[1].

由于辊压适张处理工艺和锯片材质对适张应力分布有直接影响, 为了能够准确地分析工艺条件对适张应力分布的影响, 以弹性力学中接触问题理论为基础, 应用有限元弹塑性分析方法, 进行了国产圆锯片辊压适张处理的应力分析. 分析模型考虑了影响辊压适张度的主要因素: 锯片基材塑性应力应变关系, 辊轮结构、转速, 辊压载荷、次数和位置.

1 圆锯片辊压适张处理弹塑性分析

图 1 是圆锯片辊压适张装置示意图, 辊压时上下辊均为主动辊并等速旋转. 理论研究与实验分析表明, 圆锯片辊压适张时, 因辊压载荷的作用, 辊轮与圆锯片在接触区域(辊压带)应力达到锯片材料的屈服极限而产生局部的塑性变形, 但接触区域之外仍为弹性区域.

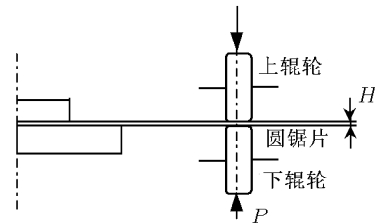


图 1 辊压适张示意图

根据弹性力学接触问题理论, 确定圆锯片受辊压载荷作用后的几何模型如图 2 所示. 基于圆锯片结构和载荷的对称性, 弹塑性分析只考虑圆锯片的上半部分 ($h = H/2$). 图中: $[-L, L]$ 为接触区间; R 为辊轮横截面弧顶半径; P 为辊压载荷; a 为锯片内孔半径; b 为锯片半径.

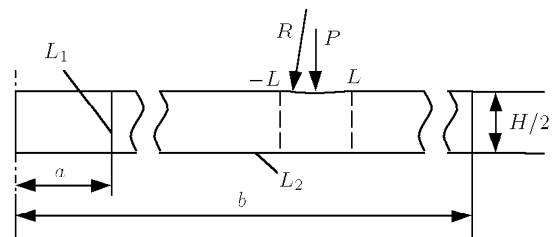


图 2 有限元弹塑性分析模型

1.1 接触区间的确定

本研究以区间 $[-L, L]$ 表征二维模型上接触区域, 并根据弹性力学中压头与弹性半平面 ($y \geq 0$) 相接触问题理论, 确定椭圆接触面长短轴半径 a_0, b_0 , 坐标系 x_1, y_1, z_1 和 x_2, y_2, z_2 分别固连在物体 I 和 II 上, 坐标原点 O 设在接触点, 其附近两曲面方程

2004-10-25 收到第 1 稿, 2005-09-02 收到修改稿.

1) 北京林业大学“质量工程”教学改革项目资助.

表示为

$$2z_1 = K_{11}x_1^2 + K_{12}y_1^2 \quad (1)$$

$$2z_2 = K_{21}x_2^2 + K_{22}y_2^2 \quad (2)$$

定义 φ 为 x_1 轴与 x_2 轴的夹角. 令

$$A' = \frac{1}{2}(K_{11} + K_{12} + K_{21} + K_{22}) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_2'}\right) \quad (3)$$

$$B' = \frac{1}{2}[(K_{11} - K_{12})^2 + (K_{21} - K_{22})^2 + 2(K_{11} - K_{12})(K_{21} - K_{22})\cos 2\varphi]^{1/2} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'}\right)^2 + 2\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_1'}\right)\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_2'}\right)\cos 2\varphi\right]^{1/2} \quad (4)$$

引入 $\cos \theta = B'/A'$, 则椭圆接触面的长半轴 a_0 和短半轴 b_0 分别为

$$a_0 = \alpha \cdot \sqrt[3]{\frac{3P}{4A'}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)} \quad (5)$$

$$b_0 = \beta \cdot \sqrt[3]{\frac{3P}{4A'}\left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}\right)} \quad (6)$$

α, β 均为系数, 其值可根据算出的 θ 值, 查表得 [4].

本研究中辊压带两曲面方程表示为

$$2z_1 = K_{11}x_1^2 + K_{12}y_1^2, \quad z_2 = \text{const}$$

其中 $K_{11} = 1/R_0$, $K_{12} = 1/R$. 由于实际辊轮一般 $R_0 \geq R$, 因而区间长度 $2L = 2b_0$ (即短半轴 b_0 的 2 倍).

1.2 有限元塑性分析

1.2.1 创建有限元模型

采用 ANSYS 有限元软件建立图 2 有限元模型, 选用 8 节点二维实体单元 PLANE82 进行剖分. 由于辊压带环近似等截面细长结构, 因而定义单元特性为平面应变.

锯片材质为 65Mn 钢, 弹性模量 210 GPa, 泊松比 0.3. 选择多线性随动强化塑性选项, 填充数据通过 65Mn 薄板压缩试验获得. 图 3 为 65Mn 薄板压缩时的应力 - 应变曲线 (σ - ε_3 曲线), 和基于 Hollomon 纯幂指数关系建立的近似应力 - 应变关系式: $\sigma = 1.8566 \times 10^4 \varepsilon_3^{0.5506}$, $\varepsilon_3 \in [0, 0.7]$.

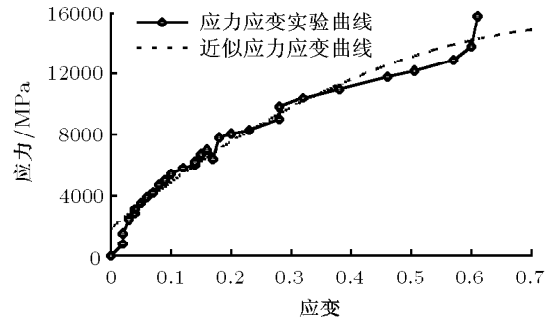


图 3 65Mn 薄板压缩时的应力 - 应变曲线与近似应力 - 应变曲线

1.2.2 约束和载荷的施加

考虑到辊轮的刚度较圆锯片大, 在有限元塑性分析时, 刚化了压头底面接触曲线 (图 2 所示接触区间 $[-L, L]$ 间的曲线), 即对其施加了 Y 方向的耦合约束.

由于圆锯片在辊压过程中, 通过锯片内孔配合辊压机凸台定位, 限制了内孔壁水平方向的位移, 因而对图 2 所示边界 L_1 施加 X 方向的约束. 基于锯片结构和载荷的对称性以及平面应变的单元特性, 对边界 L_2 施加 Y 方向的约束.

在接触区间 $[-L, L]$ 的曲线中点处施加辊压载荷 P , 本模型求解的是单一载荷步作用的结果, 载荷作用时间按照辊轮转过对应弦长 $2a_0$ (a_0 为椭圆接触面长半轴) 的圆弧所需时间.

1.3 实例分析与讨论

表 1 是国产辊压适张圆锯片 (材质为 65Mn) 的基本参数. 实验采用固定 ψ_0 法 (X-350A), 在径向线散点处测定其径向和切向的表面残余应力如表 2 所示.

表 1 国产辊压适张圆锯片 (材质为 65Mn) 基本参数

	尺寸规格 $a \times b \times H/\text{mm}$	处理工艺	辊压工艺参数					
			R_0/mm	R/mm	P/kN	R_t/mm	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	N
实例 I	15×150×2.0	热处理 (HRC42-45)+ 磨削 + 辊压	90	5.0	5.3	69.0	36	1
实例 II	15×150×1.8	热处理 (HRC42-45)+ 辊压	160	6.4	35.5	86.7	60	2

表 2 实例 I 和 II(X 射线衍射法) 测定应力值

实例 I			实例 II		
r/mm	σ_r /MPa	σ_t /MPa	r/mm	σ_r /MPa	σ_t /MPa
35	-131	223	46.5	-20	7
47	-127	176	63	-86	-19
64	-77	207	81	-61	-64
68	-203	-16	84	-195	-218
75	-87	208	87	-68	-74
97	-100	242	97.5	-30	7
115	-134	207	115.5	25	-9
135	-56	249	132	-21	-6

图 4 和图 5 所示是有限元分析结果与 X 射线衍射法测定的应力比较。从图中可以看出，在辊压带的内侧和外侧：实例 I 由于磨削的影响，实验测定的应力并不单纯反映辊压适张的效果，而且磨削后再辊压适张起到了提高径向压应力和切向拉应力的作用；实例 II 由于热处理后直接辊压，排除了其他工艺的影响，因而在数值上分析结果与实验值更为接近。

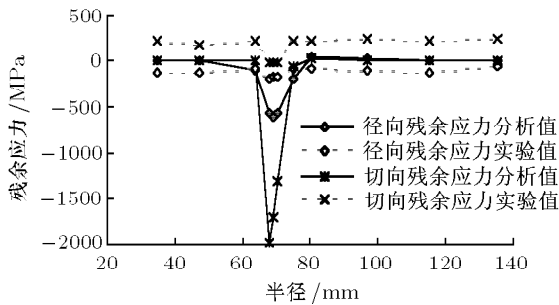


图 4 实例 I 径向和切向应力有限元分析值与实验值比较

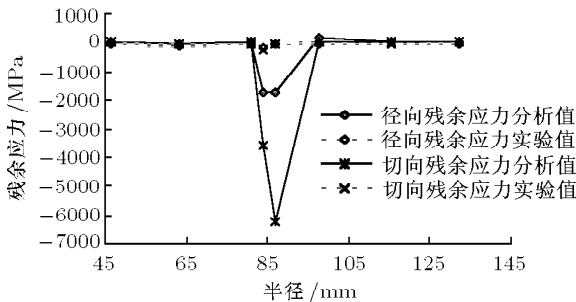


图 5 实例 II 径向和切向应力有限元分析值与实验值比较

在辊压带附近，有限元分析结果与实验值存在着较大的差别。需要指出的是，X 射线衍射法应力分析的基础是 $\sin^2 \psi$ 法，即假定 X 射线照射的材料区域处于平面应力状态，晶格应变 $\varepsilon_{\phi, \psi}^J$ 与 $\sin^2 \psi$ 线性相关，然而，由于辊压作用产生塑性变形，使得辊压处基材晶粒破碎或变长，导致晶格应变 $\varepsilon_{\phi, \psi}^J$ 对 $\sin^2 \psi$

出现非线性关系。对于晶格应变 $\varepsilon_{\phi, \psi}^J$ 对 $\sin^2 \psi$ 出现非线性分布的材料状态，需采用特殊的测试方法或数据处理程序 [5]。因而，本实验在辊压带附近测得的应力状态仅表明了该处应力分布的形式，并非确切反映该处真实的残余应力值。并且根据实际加工生产对适张效果的评价要求，辊压适张的关键是能否在靠近锯齿的外环区引入足够的切向张应力，因此，辊压带外侧的应力状态是实验检测与理论研究的重点。从图 4 和图 5 可见，本研究中在辊压带外侧的应力分布计算结果与实验测量值比较一致，说明本文建立的模型能真实的反映辊压带外侧的应力状态，并对加工及评价具有指导作用。

2 结 论

为了提高国产圆锯片生产加工工艺水平，并能够准确预测辊压适张后的应力分布，本文以弹性力学中接触问题理论为基础，应用有限元弹塑性分析方法，对圆锯片辊压适张过程进行了应力分析，分析模型中考虑了影响辊压适张度的主要因素：锯片基材塑性应力应变关系、辊轮结构、辊轮转速、辊压载荷、辊压次数和辊压位置。结果表明有限元分析结果与 X 射线衍射法测定的应力分布比较一致。

参 考 文 献

- 1 张占宽, 习宝田. 圆锯片局部受轴向压力作用下的塑性变形及强化. 木材加工机械, 2002(2): 2~4 (Zhang Zhankuan, Xi Baotian. Plastic deformation and strengthened phenomenon of some areas of circular saw exerted axial pressure on. *Wood Processing Machinery*, 2002 (2): 2~4 (in Chinese))
- 2 耿德旭, 王向东等. 适张度的辊压加工及对圆锯片的动态性能影响. 东北电力学院学报, 2003(2): 53~56 (Geng Dexu, Wang Xiangdong. Rollin machining tensioning which influence on the dynamic performance of circular saw blade. *Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering*, 2003(2): 53~56 (in Chinese))
- 3 王炜. 转动的圆盘. 力学与实践, 2002(5): 71~72 (Wang Wei. Turning round plate. *Mechanics and Practice*, 2002(5): 71~72 (in Chinese))
- 4 黄炎编著. 局部应力及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1986. 66~82 (Huang Yan. Local Stress and Application. Beijing: Machine and Industrial Press, 1986. 66~82 (in Chinese))
- 5 张定铨, 何家文著. 材料中残余应力的 X 射线衍射分析和作用. 西安: 西安交通大学出版社, 1997. 75~90 (Zhang Dingquan, He Jiawen. X-ray Diffraction Analysis and Function of the Residual Stresses in Material. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1997. 75~90 (in Chinese))

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE RESIDUAL STRESSES IN CIRCULAR SAW BLADE INDUCED BY ROLL TENSIONING

BIAN Keke* ZHAO Dong* HU Shiyu†

*(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

†(College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract Roll tensioning is a prestressing procedure commonly used to increase the stability of circular saws. This paper describes how the finite element method can be used to analyze the residual stresses induced by roll tensioning. As the results measured by X-ray disagree with the calculations on the basis of three-region theoretical model, this paper introduces a new model, in which the main parameters affecting roll tensioning include plastic constitutive relationship of the material, structure and rotational speed of roller, applied pressure, tensioning radius, times of tensioning. The results of residual stresses agree with experimental measurements.

Key words circular saw blade, roll tensioning, finite element method