

# 圆锯片柱面多区域塑性加压适张效果分析

李 博, 张占宽

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 利用ABAQUS 非线性有限元分析软件, 建立集适张应力场和振动模态分析于一体的圆锯片柱面多区域塑性加压适张过程的弹塑性仿真模型, 分析圆锯片的适张效果, 并利用X射线应力检测仪, 实测圆锯片柱面多区域塑性加压后内部的适张应力场。结果表明: 理论分析与实测适张应力场分布趋势近似, 圆锯片外缘区域生成的切向拉应力超过100 MPa, 证明了圆锯片柱面多区域塑性加压的可行性, 并为加压工艺的优化提供理论依据。

**关键词:** 圆锯片; 适张; 有限元模型; 应力; 振型; 固有频率

中图分类号: TS64 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2018) 01-0015-04

## Tensioning Effect Analysis on a Circular Saw Blade after Multi-Zone Plastic Compression by Cylindrical Surface

LI Bo, ZHANG Zhan-kuan

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** An elastic-plastic simulation model for multi-zone plastic compression of a cylindrical surface was built based on ABAQUS nonlinear finite element analysis software in order to analyze both stress field tensioning and the vibration mode of circular saw blades. Simulated stress field tensioning was in good consistence with experimental results obtained by an X ray stress meter. Theoretical analysis and measured tangential stresses in the outer edge of the saw blade all exceeded 100 MPa. Multi-zone plastic compression was proved to be feasible and the simulation model provided a theoretical basis for optimizing pressing processes.

**Key words:** circular saw blade; tensioning; finite element model; stress; vibration mode; natural frequency

圆锯片锯切木材的过程中, 木材的损耗均来自锯路损失。降低圆锯片厚度, 是提高木材利用率的有效方法。圆锯片越薄, 附加值越高<sup>[1]</sup>。

切削木材过程中, 圆锯片的外缘因切削摩擦而产生热, 其温度高于锯轴夹盘附近的温度, 产生的温度梯度可导致锯片产生热应力, 锯片外缘的切向

热应力逐渐呈现压应力的状态, 不利于圆锯片稳定切削。当切向压应力增至一定程度, 很小的横向扰动都可致使圆锯片失稳变形, 直接导致锯切精度和表面加工质量降低, 摩擦发热加剧, 锯片寿命缩短等问题<sup>[2]</sup>; 圆锯片越薄, 问题越严重。提高超薄圆锯片的动态稳定性, 是圆锯片制造行业面临的主要问题。

对圆锯片进行适张处理, 即通过机械或物理手段, 使圆锯片局部区域产生塑性变形, 进而使圆锯片内部生成数值适量、分布合理的适张应力场, 不仅可以抵消圆锯片锯切过程中产生的不良热应力, 还可提高圆锯片的固有频率, 进而提高其临界转速。

收稿日期: 2017-04-01; 修改日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31600458); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2017SY039)。

作者简介: 李博 (1986—), 男, 中国林科院木材工业研究所助理研究员。

圆锯片适张方法主要包括：锤击、辊压、在线加热等。国内外学者对锤击、辊压等方法适张后圆锯片的适张应力场和振动模态进行了相关研究<sup>[3-5]</sup>。锤击适张时，锤击力、锤击点难以精确控制，无法对圆锯片进行双面对称锤击，很难获得分布均匀的适张应力场；辊压适张时，适张应力分布不理想，且反复辊压同一适张带，会使锯片的静态刚度下降，特别是对超薄圆锯片的生产极为不利；在线热适张所需设备复杂，目前仅停留在理论与研究阶段<sup>[6]</sup>。

圆锯片柱面多区域塑性加压，是一种新型适张方法，即利用柱面压头，沿圆锯片径向，通过液压机实现圆锯片多区域的塑性加压，生成适张应力场。圆锯片的适张应力场、振动模态及各阶固有频率，是决定其动态稳定特性的主要指标，然而，上述指标的演变规律还未获得清晰的认识，缺乏相关理论模型。

ABAQUS 非线性有限元软件，集成隐式静力学求解方法、显式动力学求解方法和 Lanczos 模态分析算法，在金属塑性成形过程数值模拟方面，应用广泛<sup>[7-8]</sup>。圆锯片柱面多区域塑性加压适张过程，属于准静态加载过程。通过调整计算参数，显式动力学求解方法，能近似模拟准静态加载过程，有效提高计算效率和计算稳定性<sup>[2, 9]</sup>。

鉴此，笔者利用 ABAQUS 软件建立了圆锯片柱面加压后适张应力场和模态分析的仿真模型，分析圆锯片的适张效果，并与 X 射线应力检测仪的实测结果对比，旨在探究圆锯片适张应力场、振动模态及对应固有频率的演变规律，提供依据及分析手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

圆锯片：65Mn 弹簧钢，硬度 HRC42，外径 350 mm，中心孔径 30 mm，厚度 1.8 mm，产自天津。

### 1.2 试验设备

柱面压头，直径 120 mm，宽度 25 mm，弦高 40 mm，材质 T10 碳素工具钢，硬度 HRC60；冷压机，最大压力 500 kN；X 射线应力测试仪。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 圆锯片柱面多区域塑性加压

圆锯片表面塑性加压区域（图 1），共 16 个加压

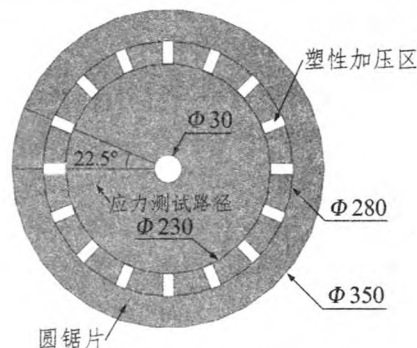


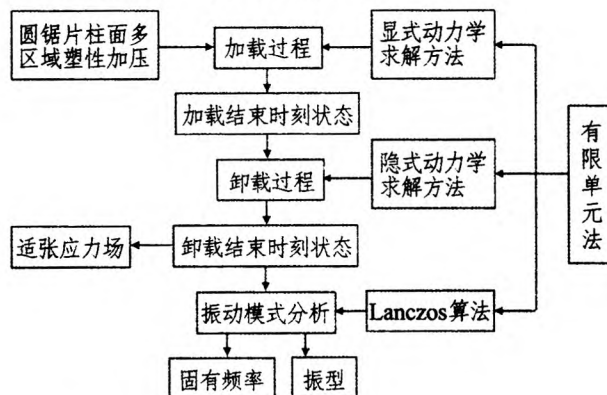
图 1 圆锯片柱面塑性加压区分布

Fig.1 Plastic compression zone distribution of a cylindrical surface

区，呈环向分布。将圆锯片固定于上下完全相同的柱面压头之间，缓慢加载，加载力保持在 332 kN 左右，逐个区域完成塑性加压。

#### 1.3.2 适张效果分析模型

1) 模型建立技术路线如下。



模型相关参数：

① 几何模型：圆锯片直径 350 mm，中心孔直径 30 mm，厚度 1.8 mm；柱面压头直径 120 mm，宽度 25 mm，弦高任意给定即可。

② 材料模型：不考虑柱面压头的弹性变形；将圆锯片基体本构关系模型设置为具有线性硬化的弹塑性，屈服强度 430 MPa，应变硬化率 1 000 MPa，弹性模量 210 GPa，泊松比 0.3，密度 7.8 g/mm<sup>3</sup>。

③ 约束条件：柱面压头对圆锯片两端面进行同步对称加压，多个加压区域同步加压；对圆锯片中心孔内壁施加约束，约束其所有的自由度；给柱面压头施加 332 kN 的加载力。

④ 网格划分：柱面压头为离散刚性体，只需简单网格划分；圆锯片选择实体 8 结点减缩积分单元 C3D8R 进行建模，网格划分后的模型如图 2 所示。

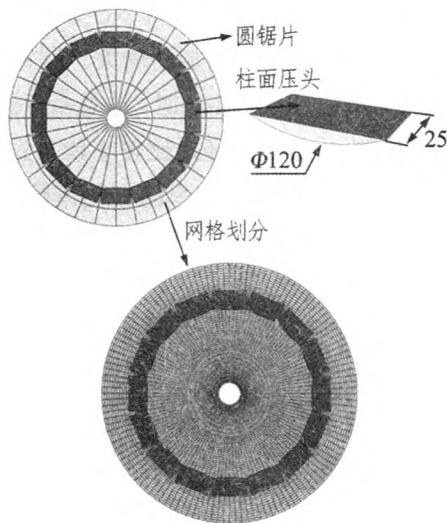


图 2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

## 2) 模型验证

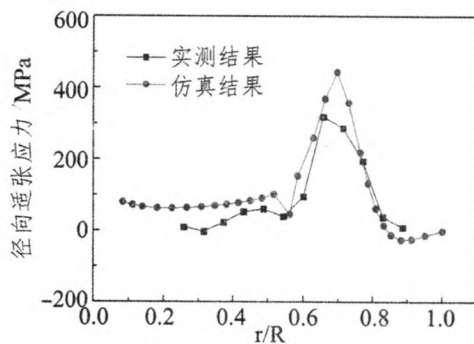
所建有限元模型包括两部分：适张应力场分析模型与动态特性分析模型。适张应力场的分布趋势和数值精度，直接决定圆锯片振动模态分析的准确性。因此，通过对比适张应力场的计算结果与 X 射线应力测试仪的测试结果，以验证有限元模型的精度。具体方法如下：

塑性加压完成后，取下圆锯片，利用 X 射线应力检测仪，实测适张后圆锯片（图 1）路径上的适张应力，路径上由内向外分布 12 个测点。最外一个测点（第 12 点）距锯片边缘 20 mm，相邻两测点的间距 10 mm。

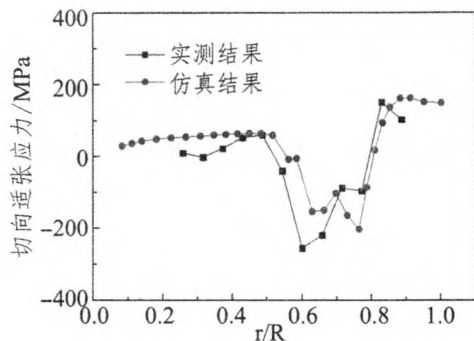
## 2 结果与分析

### 2.1 适张应力场分析

图 3 所示为适张应力场的有限元模型计算结果与实测结果。



a 径向适张应力



b 切向适张应力

图 3 适张应力计算结果与实测结果对比

Fig.3 Comparison between simulation and experimental tensioning stress results

由图 3 可知，计算结果与实测结果的数值大小和分布趋势近似吻合，圆锯片的外缘产生的切向拉应力均超过 100 MPa。

通过仿真分析与实测结果可知，圆锯片外缘附近，切向适张应力呈拉应力的状态，有助于圆锯片在切削工件的过程中更好地抵消不良热应力，保持稳定。

### 2.2 动态特性分析

圆锯片的振动，可被视为一系列单独振动模态的总和。每一振动模态，均具有特定的振型，并按固有频率振动；每个振动模态，均包含一个整数的波节圆数  $N_c$  和波节直径数  $N_d$ 。圆锯片  $N_c=0$ 、 $N_d$  在 1~4 范围内的振动模态和固有频率，是表征适张效果的特征参数。

利用所建模型，获得了圆锯片适张后的振动模态及其对应的固有频率，如图 4 所示。由图 4 可知，当  $N_c=0$ 、 $N_d=0$  时，圆锯片仅有一个振动模态；当  $N_c=0$ 、 $N_d \geq 1$  时，圆锯片具有两个振动模态。

圆锯片适张前后的固有频率，列于表 1。

表 1 圆锯片适张前后的固有频率

Tab.1 Natural frequency of a circular saw blade before and after the tensioning processes

| 固有频率/Hz | 模态                 |                    |                    |                    |                    |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|         | $N_c=0$<br>$N_d=0$ | $N_c=0$<br>$N_d=1$ | $N_c=0$<br>$N_d=2$ | $N_c=0$<br>$N_d=3$ | $N_c=0$<br>$N_d=4$ |
| 适张前     | 51.94              | 40.10              | 69.37              | 154.42             | 271.28             |
| 适张后     | 42.03              | 52.64              | 74.06              | 183.47             | 316.23             |
| 差值      | -9.91              | 12.54              | 4.69               | 29.05              | 44.95              |

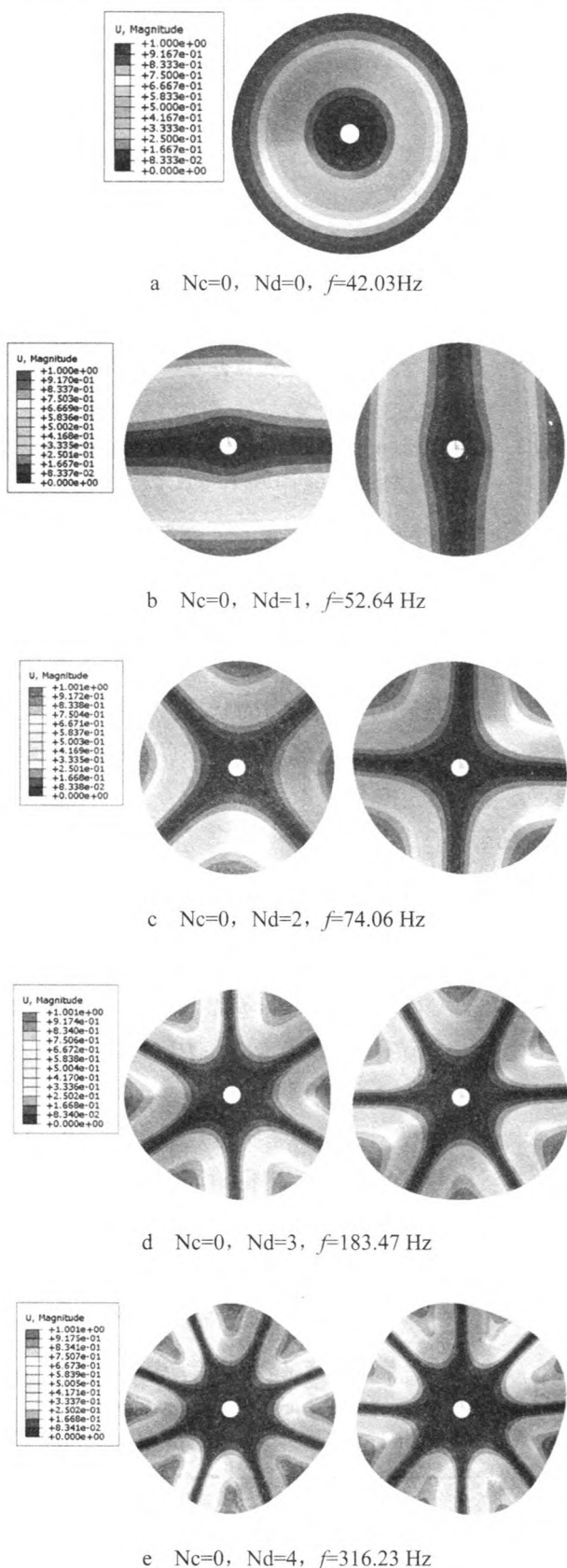


图4 圆锯片适张后的振型和固有频率

Fig.4 Vibration mode and natural frequency of a circular saw blade after tensioning processes

由表1可知,适张前,圆锯片  $N_c=0$  且  $N_d$  在1~4范围时,固有频率随  $N_d$  增加而增大。圆锯片  $N_d=1$  对应的固有频率略小于  $N_d=0$  时,这是由于圆锯片的夹盘直径与圆锯片外缘直径之比较小所导致<sup>[10]</sup>。

上述计算结果及固有频率的变化规律,与以往的研究结果相近<sup>[11-12]</sup>,证明了本研究模态分析模型的准确性。

经柱面多区域塑性加压适张处理后,圆锯片的各阶固有频率均有明显变化。圆锯片  $N_c=0$ 、 $N_d=0$  时,固有频率有所减小;圆锯片  $N_c=0$ 、 $N_d=1$  时,固有频率增加;圆锯片  $N_c=0$ 、 $N_d \geq 2$  时,固有频率均明显增加,这与锤击、辊压适张对圆锯片固有频率的改变效果相同。说明柱面多区域塑性加压适张工艺,能有效提高圆锯片的动态特性。

通过上述分析可知,柱面多区域塑性加压适张后,圆锯片内部能够生成分布合理的适张应力场,  $N_c=0$ 、 $N_d \geq 1$  的固有频率均有一定程度的增加,适张效果明显,但仍有一定提升空间。通过优化加压区域分布、压力大小、柱面压头尺寸等参数,可进一步优化适张效果。

### 3 结论

1)圆锯片柱面多区域塑性加压应力场-振动模态一体化分析模型的仿真结果与实测结果吻合,模型的准确性高。

2)圆锯片经柱面多区域塑性加压适张后,外缘产生一定数量的切向拉应力,  $N_c=0$ 、 $N_d \geq 1$  的固有频率均有一定程度的增加,理论上验证了圆锯片柱面多区域塑性加压适张工艺的可行性。

3)利用所建模型,还可进一步分析加压区域分布、压力大小、柱面压头尺寸等参数对圆锯片适张效果的影响规律及作用机理。

在大批量加工圆锯片时,可利用该模型预先模拟圆锯片的适张效果,进而确定加压区域分布、压力大小等参数,按优化的圆锯片柱面多区域塑性加压适张工艺组织生产。

### 参考文献:

- [1] 杭州大和热磁电子有限公司. 硬质合金圆锯片和超薄锯片的设计制造[J]. 木材工业, 2001, 15(6): 33-34.

(下转第24页)

### 2.4.1 试样制备

GB/T 17657-2013 对试样尺寸规定了误差范围,便于实际操作,而 EN 717-2:1995 则无要求。两个标准都要求至少重复一次试验,如果 2 次试验平均值之差 $>0.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,还应进行第三次测试。试验前都要求所有侧边密封,具体要求见表 8。

表 8 气体分析法试样制备要求

Tab.8 Sample preparation process by gas analysis method

| 标准代号            | 试样尺寸/mm     |            | 备注               |
|-----------------|-------------|------------|------------------|
|                 | 长           | 宽          |                  |
| GB/T 17657-2013 | 400 $\pm$ 2 | 50 $\pm$ 1 | 每次试验用 1 块,侧边全部密封 |
| EN 717-2:1995   | 400         | 50         |                  |

### 2.4.2 分析过程

GB/T 17657-2013 要求洗瓶中蒸馏水量范围为 20~30 mL,而 EN 717-2:1995 要求 20~80 mL。我国标准更有利于统一测试设备,减少系统误差。

其他测试条件的要求完全一致,装置均为(60 $\pm$ 0.5) $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 3\%$ 的带压密闭箱;空气流量控制在(60 $\pm$ 3) L/h,载有试样释放甲醛的空气,每 h 经过一组新的串联洗瓶,连续测试 4 h;用乙酰丙酮法测定洗液中甲醛浓度,以算术平均值表示试样的甲醛释放量。

## 3 小结

作为木质材料的生产、消费和出口大国,我国已制订了全面、系统的木质材料甲醛检测标准。这些标准基本是参照了国际标准的可取之处,又结合了我国的国情,还考虑到实际操作过程的影响,精

度高,结果准确可靠。

美国标准中,考虑试验过程温度的影响并加以修正,同时气候箱法测定过程考虑了试样材料种类的区别,制定不同的承载率要求,这些细节值得我国标准修订时借鉴。

### 参考文献:

- [1] 中国林产工业协会,国家林业局林产工业规划设计院. 中国人造板产业报告 2017[R], 2017.
- [2] 肖小兵. 我国人造板产业发展现状[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 11-14, 28.
- [3] 徐有明,李婷,夏青青. 细木工板生产和市场管理存在问题及其改进方向[J]. 林业科技开发, 2015, 29(05): 5-9.
- [4] 周定国. 人造板甲醛释放[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [5] 祝淘,毛伟光,包小霞. 环保型木材保护剂的研究与开发[J]. 中华卫生杀虫药械, 2007(2): 150-151.
- [6] 姬宁,杨守禄,李丹. 单板类人造板防腐研究概述[J]. 林业科技开发, 2015, 29(3): 7-10.
- [7] 孙芳利, PROSPER Nayebare Kakwara, 吴华平, 等. 木竹材防腐技术研究概述[J/OL]. 林业工程学报, 2017(5): 1-8.
- [8] 周大勇,许全民,章丽娜,等. 家具中有害物质释放机理的研究探讨[J]. 轻工标准与质量, 2013(1): 31-33.
- [9] Mohamed Z.M. Salem, Martin Böhm, Jaromír Srba, Jitka Beránková. Evaluation of formaldehyde emission from different types of wood-based panels and flooring materials using different standard test methods[J]. Building and Environment, 2012, 49: 86-96.
- [10] 朱海欧,卢志刚,李翔,等. 人造板标准甲醛检测技术和方法解析[J]. 木材工业, 2009, 23(5): 37.
- [11] Jarnstorm H, Saarela K, Kalliokoski P. Comparison of VOC and ammonia emissions from individual PVC materials, adhesives and form complete structures[J]. Environment International, 2008, 34(3): 420-427.
- [12] 郭飞燕,于海霞,马轩,等. 高效液相色谱法测定人造板中甲醛含量的新方法[J]. 林业科技开发, 2015, 29(06): 109-112.
- [13] 于晓芳,王喜明,樊志刚. 板材含水率对游离甲醛释放量的影响[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2011, 32(04): 238-241.

(责任编辑 姜征、向琴)

(上接第 18 页)

- [2] 赵二东,李黎,严雄林. 开槽圆锯片热变形的试验研究[J]. 木材工业, 2004, 18(6): 25-27, 31.
- [3] Li S, Wang C, Zheng L, et al. Dynamic stability of cemented carbide circular saw blades for wood-cutting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238: 108-123.
- [4] Gary S, Mats E, Anders G. Practical measurement of circular saw vibration mode shapes [J]. Wood Material Science and Engineering, 2012, 7(3): 162-166.
- [5] Ishihara M, Murakami H, Ootao Y. Genetic algorithm optimization for tensioning in a rotating circular saw under a thermal load [J]. Journal of Thermal Stresses, 2012, 35(12): 1057-1075.
- [6] Li B, Zhang Z, Li W, et al. A numerical simulation on multi-spot pressure tensioning process of circular saw blade [J]. Journal of Wood Science, 2015, 61(6): 578-585.

- [7] 刘大海,黎俊初,常春. 基于 ABAQUS 的筋板件时效成型面回弹补偿算法[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(6): 74-78.
- [8] 王明涛,曾元松,尚建勤,等. 基于 ABAQUS 的大尺寸弹丸喷丸过程数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2012, 19(5): 109-114.
- [9] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 第 1 版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [10] 李传信,耿旭德. 普通圆锯片固有频率的理论探讨[J]. 吉林学院学报, 1996, 12(3): 159-163.
- [11] Gary S, Mote J. Analysis of roll tensioning and its influence on circular saw stability [J]. Wood Science and Technology, 1983, 17(4): 287-302.
- [12] Gary S, Mote J. Analysis of optimal roll tensioning for circular saw stability [J]. Wood and Fiber Science, 1984, 16(3): 323-338.

(责任编辑 劳万里、向琴)