

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021014

温度与离心力载荷对不同基体结构圆锯片 横向刚度的影响

安源¹, 李博¹, 张勃洋², 于铭洋²

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)



摘要: 横向刚度是影响圆锯片锯切过程稳定性的重要因素。以四种具有代表性的圆锯片基体结构为研究对象, 利用非线性有限元法建立其力学模型, 研究在温度、离心力载荷单独作用以及两者共同作用下, 圆锯片横向刚度的变化规律。结果表明: 随着圆锯片外缘温度的升高, 其横向刚度呈下降趋势; 离心力载荷可提升圆锯片的横向刚度; 圆锯片基体结构对于其横向刚度随圆锯片外缘温度的变化规律具有影响。

关键词: 圆锯片; 温度; 离心力; 刚度; 有限元法

中图分类号: TS653; TG71

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2021) 06-0044-05

Effects of Temperature and Centrifugal Load on Transverse Stiffness of Circular Saw Blades with Different Structures

AN Yuan¹, LI Bo¹, ZHANG Bo-yang², YU Ming-yang²

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The transverse stiffness was an important factor affecting the stability of circular saw blade during cutting process. In this paper, four typical structures of circular saw blades were taken as the research objects, and their mechanical models were established by nonlinear finite element method. The variation of transverse stiffness of circular saw blades were studied under the centrifugal force alone, temperature field alone, and under both conditions respectively. The results showed that transverse stiffness of circular saw blade decreased with increasing sawing temperature while the centrifugal force strengthened the transverse stiffness of circular saw blade. The structure of circular saw blade has an influence on the change of its transverse stiffness with the temperature load.

Key words: circular saw blade; temperature; centrifugal load; stiffness; finite element method

圆锯片是木材加工的基本工具。提高圆锯片

的动态稳定性, 是提高木材锯切加工利用率、保证锯切加工安全最有效的方法^[1-3]。圆锯片的横向刚度是影响其动态稳定性的重要因素, 一般情况下, 横向刚度越大, 圆锯片的动态稳定性越好。

圆锯片在锯切木材过程中, 除了受到旋转离心力作用以外, 外缘摩擦工件产生的热量向基体内部传导, 使圆锯片基体形成一定程度的温度梯

收稿日期: 2021-02-03; 修改日期: 2021-04-06

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“木材低切削量锯切理论与关键技术研究”(CAFYBB2019QB006)。

作者简介: 安源 (1980—), 男, 助理研究员。Email: hawkangel@163.com

通讯作者: 李博, 男, 副研究员。Email: libohongxing@sina.com

度。当圆锯片外缘温度达到一定值时,圆锯片将发生失稳变形,即在很小的横向力作用下,圆锯片发生很大的横向变形。以往研究亦显示^[4-5],圆锯片在锯切木材过程中形成的温度场,可以直接加剧圆锯片振动,引发热变形,降低切削质量。对于理想圆盘结构的圆锯片,由于离心力的作用,其内部会生成径向与切向的拉应力场,在拉应力场的作用下,其横向刚度呈增大的趋势^[9]。

为了在一定程度上释放切削热应力、缓解圆锯片振动、切断圆锯片驻波共振的发生路径,有学者提出了在圆锯片基体上开设径向槽、消音缝等结构的方法。研究表明,径向槽虽然在一定程度上降低了圆锯片的静态刚度,但其不稳定转速范围也因径向槽的存在而变窄^[6],从而使圆锯片在更大的转速范围内保持稳定锯切。有限元法和振动测试法分析两种结构圆锯片的临界转速的结果显示,具有消音槽的圆锯片的临界转速略低于无消音槽的圆锯片^[7]。利用有限元法分析热应力对于圆锯片动态稳定特性的影响规律表明,随着径向槽长度、环向个数的增加,圆锯片的临界失稳温度逐渐提高^[8]。以上研究表明了槽结构对于圆锯片动态稳定特性的改善作用,可见圆锯片基体结构对于其动态特性具有一定影响。

近些年,为提高圆锯片散热与排屑性能,刮刀圆锯片层出不穷,刮刀位置或在圆锯片外缘或在圆锯片内部,在木材锯切过程中,这些圆锯片同样存在性能不稳定的问题。以往研究定性地指出了在圆锯片基体开孔、槽将在一定程度上降低圆锯片的横向刚度,但是未系统分析在温度与离心力载荷作用下,具有特定基体结构的圆锯片的横向刚度将如何变化。因此,本研究选取常见的几类圆锯片基体结构作为研究对象,利用非线性有限元法建立力学模型,对比圆锯片在温度与离心力载荷作用下横向刚度的变化规律,为圆锯片基体结构设计提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

选取4种具有代表性的圆锯片,其基体材料,锯齿结构、数量、角度均相同,区别在于基体结

构径向槽和刮刀不同,具体如图1所示。

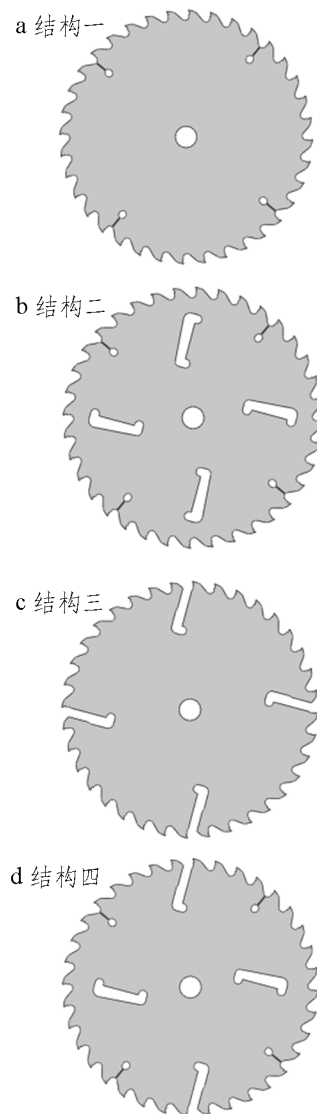


图1 4种具有代表性的圆锯片基体结构

Fig.1 Four typical structures of circular saw blades

圆锯片基体材料为65Mn钢材,根据材料的特性,在仿真模型中,将圆锯片基体材料的弹性模量设置为210 GPa,泊松比设置为0.3,密度设置为7.8 g/cm³。外缘直径均为355 mm,中心孔直径均为30 mm,厚度均为1.6 mm,安装夹盘直径均为120 mm,锯齿结构完全一致。圆锯片的工作转速为3 000 r/min。

圆锯片基体结构区别:第一种结构具有4个径向槽(图1a);第二种结构具有4个径向槽和4个内刮刀(图1b);第三种结构具有4个外刮刀(图1c);第四种结构具有4个径向槽、2个外刮刀和2个内刮刀(图1d)。

1.2 试验方法

在圆锯片尺寸参数一致的前提下，圆锯片基体结构及温度、离心力载荷对其横向刚度影响最大。本研究通过仿真模型计算不同温度、离心力载荷作用下，圆锯片的横向刚度。

1.2.1 模型建立

本研究利用非线性有限元分析软件 ABAQUS 中的 Static/General 求解模块，着重比较分析不同基体结构圆锯片在温度与离心力载荷作用下横向刚度的变化规律。

圆锯片锯切木材过程中，外缘摩擦工件产生热量。随着锯切过程的继续，圆锯片外缘温度逐渐升高并向基体内部传导，最终在圆锯片基体形成相对稳定的径向温度梯度分布。前人的研究结果表明，从圆锯片外缘到夹盘之间一半的位置，温度逐渐接近环境温度^[4]。根据以往的研究结果，本研究设置圆锯片基体温度模型如图2所示，环境温度为0℃，圆锯片外缘温度范围为0~100℃。通过改变圆锯片外缘温度值，调节圆锯片基体的温度梯度。需要说明的是，在稳态旋转下，圆锯片外缘温度低于100℃，甚至更低，而本研究考虑了圆锯片发生烧锯前、接近失稳的状态，因此将圆锯片外缘温度范围设置为0~100℃。

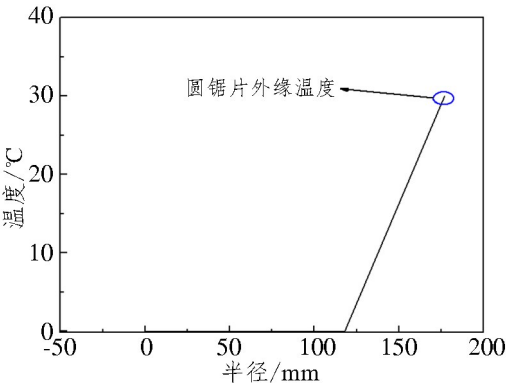


图2 圆锯片基体温度模型
Fig.2 Temperature model of circular saw blade

在圆锯片外缘任意位置施加横向集中力载荷，通过仿真计算，获得此位置的横向位移，进而获得圆锯片的横向刚度。

1.2.2 参数设置

1) 圆锯片基体不施加离心力载荷，分别设置圆锯片外缘温度为0、25、50、75、100℃，分析

温度单独作用时圆锯片横向刚度的变化规律。上述情况在实际生产中不会发生，仅作为理论研究，分析温度单独作用下圆锯片横向刚度的变化情况。

2) 在圆锯片基体不施加温度的条件下，即圆锯片空转状态，考虑圆锯片在实际工作中转速一般不超过4 000 r/min，设置旋转速度分别为0、1 000、2 000、3 000、4 000 r/min，分析离心力载荷单独作用时圆锯片横向刚度的变化规律。

3) 设置圆锯片基体转速为工作转速3 000 r/min，考虑到圆锯片外缘与工件摩擦生热，甚至可能产生烧锯现象^[9]（温度超过100℃），设置圆锯片外缘温度分别为0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100℃，分析温度和离心力载荷共同作用时圆锯片横向刚度的变化规律。

为验证仿真模型的准确性，利用试验手段测试圆锯片静态下未受温度作用的横向刚度，并与仿真模型计算结果进行比对。试验设备见图3。



图3 圆锯片横向刚度测试装置
Fig.3 Testing device for transverse stiffness of circular saw blade

2 结果与讨论

圆锯片横向刚度实测数据与理论计算结果见表1。由于试验中，横向力加载点、横向位移测试点与理论模型相比，更靠近圆锯片中心，因此其横向刚度测试结果略大于理论计算结果。

表1 圆锯片横向刚度实测数据与理论计算结果

Tab.1 Measured data and theoretical calculation results of transverse stiffness of circular saw blade

圆锯片基体结构	理论计算结果/(N·mm ⁻¹)	实测结果/(N·mm ⁻¹)
a	16.0	18.5
b	13.9	15.3
c	11.2	13.6
d	10.8	12.9

表1显示, a结构圆锯片的横向刚度最大, 是因为其基体仅有径向槽结构, 整体上仍是完整的圆盘结构; 其次是b结构圆锯片, 其基体上有4个内刮刀, 刮刀孔在一定程度上削弱了圆锯片的横向刚度, 但其外缘与a结构圆锯片相同, 虽有4个径向槽, 但仍紧密牵连; c结构圆锯片外缘有4个外刮刀, 刮刀结构相当于大的径向槽, 其较大程度地破坏了圆锯片外缘各部分的牵连, 因此横向刚度减小; d结构圆锯片, 其外缘有外刮刀和径向槽, 内部还有内刮刀, 因此横向刚度最小。

2.1 温度单独作用的影响

在不同温度作用下, 4类圆锯片的横向刚度理论计算结果, 如图4所示。

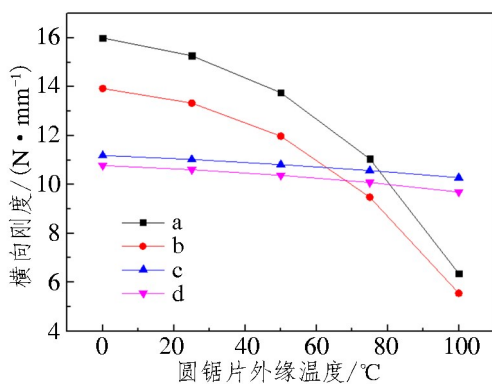


图4 不同温度作用下圆锯片的横向刚度

Fig.4 Transverse stiffness of circular saw blade under different temperatures

在不同温度的作用下, 圆锯片外缘会发生弹性热膨胀, 为使自身保持平面状态, 圆锯片内部会形成径向、切向压应力, 削弱其横向刚度。图4显示, 在不同温度的作用下, a、b两种结构圆锯片的横向刚度大幅下降, 说明圆锯片外缘的径向槽, 由于尺寸大小受限, 对于缓解圆锯片外缘弹性热膨胀的效果有限; c、d结构圆锯片的横向刚度缓慢下降, 是因为其外缘具有尺寸较大的刮刀结构, 能够缓解圆锯片外缘的弹性热膨胀, 减弱径向、切向压应力的累积。

从理论上讲, 温度梯度引起的热应力场会导致圆锯片横向刚度下降, 在木材锯切加工中, 建议做好圆锯片在线冷却措施。图4结果不仅与前人的理论研究结论一致^[3], 同时也说明了圆锯片基体结构的改变, 对于其横向刚度随外缘温度的变化幅度影响较大。

2.2 离心力载荷单独作用的影响

在不同离心力载荷的作用下, 4类圆锯片的横向刚度理论计算结果, 如图5所示。

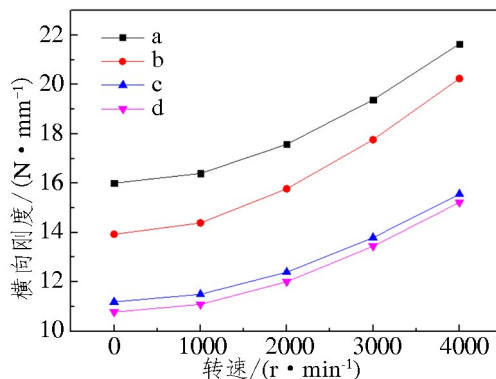


图5 不同离心力载荷作用下圆锯片的横向刚度

Fig.5 Transverse stiffness of circular saw blade under different centrifugal forces

圆锯片在高速旋转下, 由于旋转离心力的作用, 基体内部会形成径向、切向的拉应力, 这一应力状态可提升圆锯片的横向刚度, 即“刚化作用”。随着圆锯片转速的提升, 即离心力增大, 不管圆锯片结构如何, 其横向刚度均得到进一步提升, 有助于提升圆锯片的动态稳定性。

图5还反映出, 对于不同结构的圆锯片, 当转速从0提升到4 000 r/min时, 圆锯片的横向刚度增量有一定差异。圆锯片横向刚度随转速的变化规律, 在一定程度上受圆锯片基体结构的影响。

2.3 温度与离心力载荷共同作用的影响

设置圆锯片的转速为工作转速3 000 r/min, 在温度和离心力载荷的共同作用下, 4类圆锯片的横向刚度理论计算结果, 如图6所示。

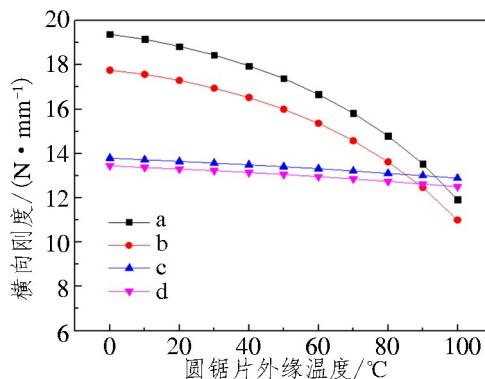


图6 温度与离心力载荷共同作用下圆锯片的横向刚度

Fig.6 Transverse stiffness of circular saw blade under different temperatures and centrifugal force loads

图6显示,在温度和离心力载荷共同作用下,4类圆锯片横向刚度的变化规律与温度单独作用时相似,不管圆锯片结构如何、所受温度如何,均不影响离心力对圆锯片的“刚化作用”。引入离心力载荷,只是将图4中圆锯片横向刚度随温度变化曲线整体向上提升,但并不存在非线性耦合的关系。

不管圆锯片结构如何,旋转状态下圆锯片承受的离心力载荷,都会提升其横向刚度,并且提升幅度相近;锯切状态下圆锯片必然承受温度的作用,温度作用会降低圆锯片的横向刚度,圆锯片越接近理想圆盘结构,温度对于横向刚度的降低程度越大。

3 结论

1) 不管圆锯片基体结构如何,旋转离心力载荷均可使圆锯片横向刚度提高,温度均可使圆锯片横向刚度下降;而圆锯片基体结构显著影响横向刚度随温度的变化规律。

2) 圆锯片横向刚度受基体结构的影响,径向槽、刮刀等结构会降低圆锯片的横向刚度。建议在圆锯片基体结构设计中,要考虑结构对于横向刚度的影响。

参考文献:

- [1] 曹平祥,郭晓磊.木材切削原理与刀具[M].北京:中国林业出版社,2010.
- [2] 齐英杰,颜良,张兆好.当代木工机械发展与检验检测技术[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,2009.
- [3] 李黎.木材切削原理与刀具[M].2版.北京:中国林业出版社,2012.
- [4] 方堃.不同工作状态下的圆锯片温度场分布规律研究[D].南京:南京林业大学,2011.
- [5] 李黎.温度场对圆锯片动态稳定性影响的理论与实验研究[D].北京:北京林业大学,2003.
- [6] Stakhiev Y M. Today and tomorrow circular sawblades: Russian version[J]. Holz Als Roh- Und Werkstoff, 2000, 58(4): 229-240.
- [7] Droba A, Javorek L, Svoren J, Dusan P. New design of circular saw blade body and its influence on critical rotational speed[J]. Drewno, 2015, 58(194): 147-157.
- [8] Merhar M, Gornik Bučar D. The influence of radial slots on dynamic stability of thermally stressed circular saw blade[J]. Drvna Industrija, 2017, 68(4): 341-349.
- [9] 张楷.木质材料锯切圆锯片温度在线检测与控制技术研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)

(上接第19页)

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(22): 132-140.
- [27] 于法稳,杨果.农作物秸秆资源化利用的现状、困境及对策[J].社会科学家,2018(2): 33-39.
 - [28] 蒋婷,陈飞月,黎飞.物流企业公路运输空载率现象分析及对策研究[J].全国流通经济,2019(24):18-19.
 - [29] 王永波,白化奎,张双保,等.刨花形态对竹材自生胶合刨花板性能的影响[J].林业机械与木工设备,2011, 39(6): 22-25.
- WANG Y B, BAI H K, ZHANG S B, et al. Effects of particle form on bamboo particle self-bonding performance[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2011, 39(6): 22-25.

- [30] 彭顺,桂成胜,林新青,等.大豆胶制备竹刨花板的工艺参数探究[J].林产工业,2017, 44(9): 19-23.
- PENG S, GUI C S, LIN X Q, et al. Study on process parameters of the bamboo particleboard bonded by soy-based adhesive[J]. China Forest Products Industry, 2017, 44(9): 19-23.
- [31] 李杨,李光.基于SolidWorks的托盘结构有限元分析及优化设计[J].包装工程,2011, 32(19): 1-4.
- LI Y, LI G. Structural finite element analysis and optimum design of pallet via SolidWorks[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 1-4.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)