

Technology for High Efficiency and
Waste Reduction During
Circular Saw Cutting Process

木材高效节材 圆锯锯切加工技术

张占宽 李 博 李伟光 著



科学出版社

木材高效节材 圆锯锯切加工技术

张占宽 李 博 李伟光 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

对木材高效节材圆锯锯切加工过程的研究是国内外木材加工技术与装备领域业界人士广泛关注的热点。针对这一研究热点,作者结合自己所在团队十几年的研究成果编写本书。本书共八章,围绕木材高效节材圆锯锯切加工技术进行阐述,包括木材切削加工的基本理论、木材圆锯锯切加工技术的基本原理与装备,重点包括圆锯片多点加压适张技术、微量零锯料角锯齿木材锯切特性与机理、圆锯片锯切温度在线检测与控制技术、硬质合金锯齿磨损变钝及切削力变化规律等内容,涵盖了与木材高效节材圆锯锯切加工技术相关的主要内容,对木材圆锯锯切加工领域相关人员具有重要的理论与实践指导意义。

本书可供从事木材加工行业的学者、企业技术人员及农林院校和综合性院校相关专业的在读学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

木材高效节材圆锯锯切加工技术/张占宽,李博,李伟光著. —北京:科学出版社, 2018.6

ISBN 978-7-03-058033-7

I. ①木… II. ①张… ②李… ③李… III. ①木材切削 IV. ①TS652

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 131763 号

责任编辑:张会格 赵小林/责任校对:郑金红

责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2018 年 6 月第一次印刷 印张: 26 3/8

字数: 532 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国森林资源现状仍然是森林面积小，资源数量少，地区分布不均。来自国家林业和草原局官方网站（<http://www.forestry.gov.cn/main/65/content-659670.html>）的数据显示，我国的森林覆盖率远低于全球 31% 的平均水平，人均森林面积仅为世界人均水平的 1/4，人均森林蓄积只有世界人均水平的 1/7，森林资源总量相对不足的状况仍未得到根本改变。随着我国经济的快速发展、人民生活水平的不断提高和人口的持续增长，对木材及木材制品的需求量也会越来越大。同时，我国还是木制家具、木门窗与木地板的生产大国，其产值和产量均居世界第一，仅木制家具的年产量就超过 1 亿件，约占世界家具总产量的 10%。因此，提高木材利用率和加工质量，减少木材资源浪费，合理高效地利用木材资源已成为我国的基本国策，也是解决木材供需矛盾的主要途径。

木材圆锯锯切因其加工效率高、操作简单、维护方便、成本低而成为木材加工处理的主要方式，在木材切削加工设备中占比达 30%~40%。高效节材圆锯锯切加工技术通过降低圆锯片厚度、增加其稳定性，进而降低木材锯切损耗、减少锯切加工能耗。该技术越来越受到木材加工企业的青睐，是国内外公认的提高木材利用率最直接有效的方法。

在降低圆锯片厚度方面，主要采用木工超薄圆锯片。而如何提高超薄圆锯片的动态稳定性一直是木材高效节材锯切加工技术的核心问题。降低超薄圆锯片锯切过程中的温度梯度、合理设计锯齿齿形、优化圆锯片基体的适张应力场，是提高超薄圆锯片动态稳定性的重要途径，也是本书关于木材高效节材圆锯锯切加工技术的核心内容。

本书作者所在项目组依托于中国林业科学研究院木材工业研究所、林业新技术研究所，长期致力于木材节材降耗锯切加工技术的研究，在国家自然科学基金面上项目“微量零锯料角锯齿木材锯切特性与机理研究（31270605）”、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“超薄木工圆锯片激光冲击适张技术研究（CAFYBB2017SY039）”、国家林业局国际先进林业科学技术引进项目“超薄木工圆锯片关键制造技术的引进（2006-4-97）”、国家林业公益性行业科研重大专项“木材产业升级关键技术研究——木材低切削量锯切冷却技术（201004006）”、农业科技成果转化资金项目“木材低切削量锯切加工技术（2013GB24320607）”、国家自然科学基金青年科学基金项目“木工超薄圆锯片激光冲击适张预应力场的生成与调控机理（31600458）”、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目“基于木材切削

的刀具表面微织构减摩机理研究(CAFYBB2018SZ015)”等项目的资助和支持下,针对圆锯片多点加压适张工艺、圆锯片微量零锯料角齿形设计理论、圆锯片制冷雾化冷却技术等展开了深入的研究。项目组经过十几年的努力,取得了一批具有较高学术水平和实用价值的成果,为使这些成果更好地得到推广应用,在国民经济建设中发挥更大的作用,我们将这些研究成果编纂成书,供广大科技工作者和产业界人士参考。

本书旨在向读者展示我国在木材高效节材圆锯锯切加工研究领域的最新研究进展和成果,为提高我国超薄圆锯片制造与应用水平提供理论基础。全书在编写过程中,注重基础理论与应用技术相结合、系统性和新颖性相结合、内容的广度与深度相结合,以翔实的科学实验数据为依据,语言朴实,结构严谨,力求为从事木材加工和利用的企事业单位人员与科研工作者及高等院校师生等相关人员提供理论与实践方面的指导。

本书引用了大量的国内外相关文献和资料,在此向其作者表示感谢!

由于作者水平有限,不妥和遗漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

著 者

2017年8月

目 录

前言	
第一章 导论	1
第一节 圆锯片适张工艺与理论发展现状概述	3
一、圆锯片适张工艺	3
二、圆锯片适张检测方法	7
三、圆锯片适张工艺与理论的研究现状	11
第二节 木材切削与圆锯片齿形设计理论发展现状概述	14
一、木材切削机理的研究现状	14
二、木材切削力的研究现状	15
三、木材切削表面粗糙度的研究现状	17
四、零锯料角锯齿与微量零锯料角锯齿锯切概述	21
第三节 圆锯片温度检测与控制技术发展现状概述	22
一、圆锯片锯切温度场的研究现状	22
二、木材锯切圆锯片在线冷却技术的研究现状	24
第四节 木工刀具磨损机理与减磨技术发展现状概述	25
一、木工刀具磨损变钝机理的研究现状	25
二、木工刀具磨损变钝与木材切削力关系的研究现状	27
第二章 木材切削的基本原理	28
第一节 木材切削的基本概念	29
一、切削运动	29
二、刀具和工件的各组成部分	31
三、刀具的角度	32
四、切削层尺寸参数	33
五、切削方向	34
第二节 木材切削的基本现象	35
一、切屑形态	35
二、切削热	39
三、切削表面质量	41
四、加工精度	41
第三节 木材切削力与切削功率	43

一、切削力	43
二、切削阻力	45
三、切削条件	49
四、切削力和切削功率的计算	50
第四节 木工刀具材料及刀具磨损	57
一、木工刀具特点	57
二、木工刀具切削部分材料应具备的性能	58
三、常见木工刀具材料	58
四、木工刀具磨损	66
五、木工刀具抗磨技术	69
第三章 木材圆锯锯切及设备	71
第一节 锯与锯切加工概述	71
一、锯	71
二、锯齿的切削	72
三、锯切运动	74
第二节 圆锯片	75
一、圆锯片的种类与结构	75
二、圆锯片的动态稳定性	84
第三节 圆锯机	92
一、纵剖圆锯机	92
二、横截圆锯机	100
第四节 锯板机	103
一、概述	103
二、立式锯板机	104
三、带移动工作台锯板机	109
四、锯片往复木工锯板机	114
五、数字控制锯板机	119
第四章 圆锯片多点加压适张工艺理论与实验研究	124
第一节 圆锯片振动模态分析理论	124
一、振动问题求解的概述	124
二、时域信号的测量	128
三、小结	130
第二节 圆锯片 X 射线应力检测理论	130
一、X 射线应力检测理论概述	130
二、X 射线衍射现象	131
三、X 射线表面残余应力测量的原理	132

四、X 射线应力测量方法	133
五、数据处理方法	134
六、小结	138
第三节 圆锯片适张实验研究的主要实验设备及方法	138
一、多点加压适张实验压机与压头的设计	138
二、圆锯片振动模态分析设备	139
三、圆锯片 X 射线应力检测设备及其标定	140
四、小结	141
第四节 圆锯片局部区域轴向压力作用下的塑性变形与强化机理	142
一、金属塑性变形及强化机理	142
二、圆锯片单点加压塑性形变实验研究	143
三、小结	144
第五节 圆锯片初始残余应力测试与分析	144
一、侧倾固定 ψ 法测定圆锯片的初始残余应力	144
二、同倾固定 ψ_0 法测定圆锯片的初始残余应力	146
三、小结	149
第六节 多点加压适张圆锯片残余应力分布的实验研究	149
一、实验材料与方法	149
二、实验结果与分析	150
三、小结	154
第七节 多点加压适张圆锯片振动模态的实验研究	155
一、实验材料与方法	155
二、实验结果与分析	156
三、小结	164
第八节 温度梯度对圆锯片固有频率的影响规律分析	164
一、实验材料与方法	164
二、实验结果与分析	164
三、小结	172
第九节 圆锯片多点加压适张工艺的理论研究	172
一、圆锯片多点加压适张工艺的力学模型分析	172
二、有限元法基本理论	186
三、圆锯片多点加压适张工艺过程的有限元建模	191
四、圆锯片多点加压适张边界切向适张应力的预测模型	192
五、圆锯片多点加压适张工艺压点分布对适张效果的影响	198
六、圆锯片的屈服强度对适张效果的影响规律	201
七、小结	202

第十节 本章小结	203
第五章 微量零锯料角锯齿木材锯切特性与机理的研究	205
第一节 圆锯锯切木材锯齿受力及锯路壁形成机理分析	205
一、微量零锯料角锯齿锯切锯路壁形成机理分析	205
二、微量零锯料角锯齿锯切切削受力理论分析	208
三、小结	211
第二节 切削力测试系统及方法	212
一、切削力测试系统组成	213
二、切削力测定方法	215
三、小结	220
第三节 不同锯料角锯齿侧刃对切削力影响的研究	221
一、工件材料及刀具	221
二、试验方法	224
三、不同切削厚度条件下的切削力	225
四、不同切削速度条件下的切削力	231
五、不同含水率条件下的切削力	237
六、不同切削方向上的切削力	241
七、小结	247
第四节 微量零锯料角锯齿切削力模型	249
一、多元回归模型分析概述	250
二、响应面优化法概述	255
三、工件材料及刀具	257
四、试验方法	258
五、响应面分析方案与试验结果	259
六、模型的分析与建立	261
七、响应面结果分析	266
八、小结	271
第五节 微量零锯料角锯齿圆锯片对锯切木材表面粗糙度影响的研究	273
一、试验材料与方法	275
二、试验结果及分析	277
三、小结	283
第六节 本章小结	283
第六章 木质材料锯切圆锯片温度在线检测与控制技术	287
第一节 圆锯片温度差的理论分析	287
一、热传导条件下圆锯片温度变化分析	287
二、热对流条件下圆锯片温度变化分析	290

三、热辐射条件下圆锯片温度变化分析	291
四、小结	292
第二节 红外测温仪的标定	292
一、红外测温仪标定的原理及方法	292
二、红外测温仪标定所需的实验仪器及设备	296
三、红外测温仪标定的实验方案	299
四、实验结果与分析	300
五、小结	304
第三节 超薄圆锯片在线温度检测	304
一、实验设备	304
二、实验材料与准备	307
三、实验结果与分析	309
四、小结	315
第四节 超薄硬质合金圆锯片在线雾化冷却系统设计	315
一、木材锯切冷却介质制冷雾化冷却系统的组成和工作原理	316
二、木材锯切冷却介质制冷雾化冷却系统的结构原理	318
三、控制系统组成与工作原理	320
四、小结	321
第五节 圆锯片在线雾化冷却系统仿真分析	321
一、圆锯片在线雾化冷却系统雾化喷头内部压力场分析	321
二、圆锯片在线雾化冷却系统雾化喷头内部流场分析	323
三、雾化喷头内部流态分析与出口流量分析	324
四、小结	324
第六节 本章小结	325
第七章 木工硬质合金锯齿磨损变钝规律及切削力研究	327
第一节 硬质合金锯齿磨损变钝规律研究	327
一、实验设备、材料及方法	327
二、测量指标	330
三、结果与分析	330
四、小结	334
第二节 切削力测试平台搭建	334
一、切削力测试系统	334
二、系统标定	336
三、切削力的定义	337
四、试件及数据处理方式	337
第三节 硬质合金锯齿切削木材时的切削力研究	338

一、切削方向对3种实木切削力的影响·····	338
二、锯齿前角对3种实木切削力的影响·····	347
三、切削速度对3种实木切削力的影响·····	350
四、切削厚度对3种实木切削力的影响·····	356
五、含水率对3种实木切削力的影响·····	363
六、锯齿磨损变钝对3种实木切削力的影响·····	370
七、小结·····	377
第四节 硬质合金锯齿切削两种人造板时的切削力研究·····	378
一、锯齿前角对中纤板和刨花板切削力的影响·····	379
二、切削速度对中纤板和刨花板切削力的影响·····	381
三、切削厚度对中纤板和刨花板切削力的影响·····	386
四、含水率对中纤板和刨花板切削力的影响·····	390
五、锯齿磨损变钝程度对中纤板和刨花板切削力的影响·····	393
六、小结·····	398
第五节 本章小结·····	399
第八章 木材锯切加工技术展望·····	401
第一节 圆锯片激光冲击适张工艺·····	401
一、激光冲击技术·····	401
二、圆锯片激光冲击适张·····	402
第二节 超高强度圆锯基体的制造技术·····	403
第三节 新型刀具材料的发展方向·····	404
第四节 木工刀具表面微织构减磨技术·····	404
第五节 圆锯片适张应力检测技术展望·····	405
一、扫描电子声显微镜技术·····	406
二、超声波应力检测技术·····	406
参考文献·····	407

第一章 导 论

木材作为一种绿色、可再生、可循环的重要材料，在人们的日常生活中起着非常重要的作用，具有许多不可替代的优势。我国是人口大国，对木材的需求量巨大并呈现日益增长的趋势；而我国又是木材资源稀少的国家，每年都要从东南亚、非洲、北美洲及俄罗斯等地区或国家进口大量的板材。随着全球木材资源的不断紧缺及我国天然林保护工程的实施，经过对林区进行禁伐、限伐后，优质的木材原料供应持续下降。统计资料显示，2016 年木材与木制品行业总产值约为 2 万亿元，增速为 3.00% 左右。2016 年全国木制家具总产量 79 464.15 万件，强化木地板约 2.105 亿 m^2 ，实木复合地板 1.045 亿 m^2 ，实木地板 4390 万 m^2 ，竹地板 3400 万 m^2 。2016 年，我国共进口木材（原木和锯材）折合原木材积为 9347.18 万 m^3 ，同比增加 13.56%（谢满华和刘能文，2017）。预计在今后相当长的时期内，木材都将成为我国经济领域的一大稀缺资源。当前我国进入全面建成小康社会决胜阶段，国民经济的快速发展和人民生活水平的不断提高及我国城镇化进程的不断加快，促进了我国家具和地板行业特别是多层实木复合地板和重组竹地板的快速发展，增大了对珍贵木材和竹材的需求量，使我国对优质木材的需求量逐年增加；我国实行的“天然林保护工程”是一项跨世纪的伟大生态工程，对于遏制生态环境恶化，保护生物多样性，促进社会、经济的可持续发展具有非常积极的意义，同时也导致一些地区木材原料，特别是珍贵木材的供需矛盾日益突出。我国人工林种植面积和蓄积量的不断增大，对缓解这一矛盾具有积极作用，同时人工林木材的高效加工与综合利用技术受到业内专家学者的普遍重视，国家对相关领域研究项目的支持力度也在逐年增加。长期以来，提高木材加工利用率，减少木材资源浪费，已成为我国的基本国策，对促进国家“六大林业重点工程”项目建设具有非常重要和深远的历史意义（吕建雄，2002），而充分地利用现有资源、节能降耗、提高木材加工质量是落实这一基本国策的主要途径。

木材加工最常见的 3 种加工方式是锯切、刨切和旋切，通常 80% 以上的木材都要进行锯切加工。在锯切加工木材中，特别是对于人工林木材，绝大部分要利用圆锯加工；在木材制品的加工生产中，圆锯也占据非常重要的地位。圆锯片（文中的“圆锯片”，也称“锯片”）具有加工木材效率高，设备简单可靠，使用、移动和维修方便等优点，是木材加工处理的主要工具，在所有木材生产设备中占 30%~40% 的比例（王小屏，2013；母德强和崔高健，2002）。因此，降低圆锯片厚度、增加其稳定性、减少木材加工中的锯切损失是国内外公认的提高木材利用率最直接有效的方

法,超薄木工锯片在木材高效利用中扮演了重要角色。据统计,国内木材企业每年可以生产三层实木复合地板 5000 万 m^3 ,由于其表板是较好的或珍贵的木材,因此加工方式主要是采用多锯片圆锯机中的超薄圆锯片组进行锯切加工。根据锯切时的锯路宽度划分,木材锯切圆锯片分为薄圆锯片和超薄圆锯片,其中超薄圆锯片直径一般为 180~250mm、锯路宽 1.0~2.0mm。超薄硬质合金圆锯片在木材加工中常用于多层复合实木地板的表板剖分、木质百叶窗的薄板剖分、滑雪板、乒乓球板等体育运动器材的基板、铅笔基板等主要领域(曹平祥,2003)。

工业生产中一般将 6~8 片超薄圆锯片叠加安装在同一主轴上,靠垫片控制锯片与锯片之间的间隙,被称为超薄圆锯片组。超薄圆锯片组具有锯片间距小、不易散热、受热变形、失稳等缺点,严重时会导致超薄圆锯片组在短时间内失效。此外,在重组竹锯切加工过程中,由于重组竹密度较大,其中的胶黏剂含量较多,锯切时的锯切力大,锯片更易受热变形,影响锯切质量,严重时甚至引起火灾。目前,国内一些生产厂家可以生产少量的薄锯片,但在一些关键的制造技术方面如锯片材料热处理、锯片整平和适张技术、锯片内应力检测技术,以及相应的计算机控制系统等还存在一些问题有待解决。

在这些问题当中最常见也是发生最多的就是锯片本身的质量问题,表现在锯片在锯切时稳定性变差,而稳定性变差的结果是锯路损失增大,进而导致木材使用率的下降和木材资源的浪费。统计数据表明,如果把锯切损耗减小 0.8mm,能提高出材率 1%~3%(蔡力平,1987)。锯片锯切稳定性差的主要原因可以概括为以下几种情况:①锯身太薄,靠金属自身的张紧力无法使锯片保持张紧;②锯齿在锯切时得不到及时冷却导致热应力增大使锯片失稳;③锯齿及齿室太小或者锯片上消音槽形状位置不合理;④对圆锯片的加压适张度不合理,造成圆锯片的动态稳定性较差;⑤锯齿长时间锯切后刃口发生磨损变钝。在这些原因当中,锯片热应力改变是导致锯片失稳的重要因素。在木材切削能耗方面,除了消耗在加工表面用于使工件发生剪切应变的能量外,其他大部分能量转化为热能,即切削热。切削热和刀具与工件摩擦产生的热量同时使刀具温度上升,造成锯片温度梯度热应力发生改变进而使锯片出现失稳。目前,用于提高圆锯片锯切稳定性的主要方法有:①在锯切过程中对高速旋转的圆锯片进行振动主动控制;②在线冷却锯片高温区(锯齿与锯身边缘)或者加热低温区;③适当改变锯片的局部结构;④选择适当切削参数的圆锯片;⑤采用适张处理对锯片施加预应力。

当前,我国正在推行节能减排、发展低碳经济的政策,已经将其纳入了国家的中长期发展规划。对于木材加工行业来说,降低木材加工能耗、改善锯切加工质量、提高木材利用率也是木材企业发展的战略需求。中国木材加工机械制造行业市场状况分析报告指出,2012 年中国木材加工机械行业有规模以上企业 148 家,同比增长 -1.33%,其中盈利企业 133 家,亏损企业 15 家。在现有条件下,如何节能降耗、提高木材的加工和利用效率是木材机械加工企业亟待解决的重要问题。因此,对木

材节能、节材、降低锯切加工能耗的基础理论与应用研究具有重要的现实意义。

本书在总结前人成果的基础上,针对圆锯片高速锯切过程中锯片受热变形、失稳导致加工工件质量差、能耗高、锯片使用寿命短等问题,在适张处理、齿形设计、温度在线监测与调控等方面进行了深入阐述,提出了多点加压适张工艺、微量零锯料角齿形设计、基于红外测温传感器的温度在线监测技术,以及圆锯片制冷雾化冷却系统。这些成果应用在木材加工利用领域,能够使企业获得可观的经济效益,具有广阔的应用前景。

第一节 圆锯片适张工艺与理论发展现状概述

一、圆锯片适张工艺

影响圆锯片工作性能的主要因素包括它在高速回转下产生的离心应力及在切削过程中产生的热应力,如图 1-1 所示。随着木工圆锯片外缘与夹盘附近温度差的进一步增大,热应力在木工圆锯片外缘产生的切向压应力会继续增大,逐渐超过离心应力在圆锯片外缘产生的切向拉应力,使得木工圆锯片外缘总的切向应力呈现压应力的状态。这就会导致圆锯片外缘在很小的横向力作用下产生压曲变形而失稳,引发锯切精度和加工表面质量降低、锯路损失增大、切削发热进一步加剧、锯片寿命缩短等问题。这些问题随着木工圆锯片的变薄而更加突出,给超薄木工圆锯片的制造、使用与维护带来很大的困难。

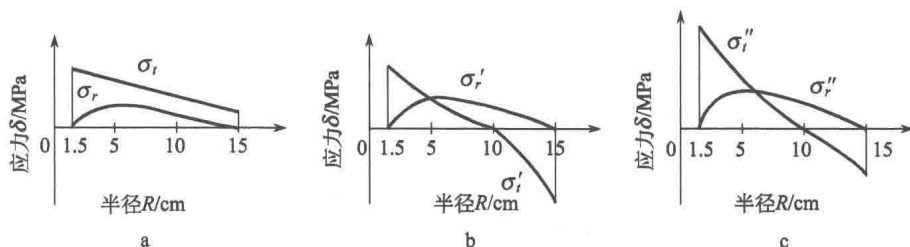


图 1-1 圆锯片工作状态下的应力分布

- a. 离心力产生的切向应力 σ_t 和径向应力 σ_r 分布; b. 锯片不均匀发热产生的切向应力 σ'_t 和径向应力 σ'_r 分布;
c. 锯片工作时锯身总的切向应力 σ''_t 和径向应力 σ''_r 分布

解决圆锯片失稳的一个最经济有效的办法就是适张 (tensioning)。所谓适张就是使圆锯片产生合理的预应力场,通过引入预应力(残余应力),控制圆锯片内的应力分布。适张后的圆锯片不仅动态刚度或稳定性获得提高,而且能够确保安全生产,因此,所有圆锯片都应该进行适张处理(张占宽等, 2005)。圆锯片的适张处理在其寿命周期内并不是一次性的。一般情况下,经过适张的圆锯片工作一段时间后,其适张影响会逐渐减弱,直到消失。因此,需要在圆锯片适张度降低到一定程度时,

再次对其进行适张处理。两次适张的间隔时间与圆锯片的结构、材料和工作情况有关。研究表明,影响圆锯片稳定性的主要因素有圆锯片材料、转速、结构、几何参数、夹持比、应力状态、适张度、自身温度场、锯机精度等。经过适张处理的圆锯片,因应力状态较为合理,稳定性提高,可减少切割损失 20%~40% (习宝田和撒潮, 1995)。另外据统计,圆锯片切削木材时的锯路损失占锯割总材积的 10%~12% (Schajer and Mote, 1983)。因此对圆锯片进行适张处理在降低能源消耗、提高木材出材率及安全生产方面都具有重要的意义。

虽然圆锯片的稳定性与多种因素有关,改变任何一种因素都可以改变圆锯片的动态稳定性,但限于使用要求,有些因素是不能任意改变的。例如,增加锯片厚度会加大锯路损失;加大夹持比会减小有效切割高度;降低转速会影响切割表面质量,同时会降低切割效率等。而通过适张的办法,在保持同等动态稳定性的情况下,可使圆锯片厚度减小 $1/3 \sim 1/2$ (Szymani and Mote, 1974)。

目前,有文献记载的圆锯片适张方法主要包括以下几种。

(一) 锤击适张处理

锤击适张处理是始于 100 多年以前的传统工艺。锤击适张是利用十字锤、螺旋锤和圆头锤,沿锯身某一圆周带敲击,使圆锯片产生对称于轴线的预应力。它有 2 种基本的敲击方法,即用十字锤或螺旋锤这些具有方向性的锤子,沿圆周方向进行锤击和沿半径方向进行锤击。在实际应用中,两种捶击方法可根据工艺要求进行多种组合,交替配合使用。

通过对两种锤击适张效果进行研究,发现沿圆周方向的锤击,一方面提高了 $n>1$ 振动模态的挠曲刚度;另一方面降低了对称于轴线的挠曲刚度。当后者被严重降低时,则靠沿径向的锤击来提高其刚度 (叶良明, 1989)。

由于锤击时的击点和力无法精确控制,产生的适张应力难以做到在锯片内均匀分布,而且锤击适张操作技能要求高且费时费力,因此锤击适张工艺很难适应工业化生产的需要,只能作为一种辅助适张手段。



图 1-2 圆锯片辊压适张设备

(二) 辊压适张处理

辊压适张的工艺原理是使圆锯片置于上下两个压辊之间,如图 1-2 所示,压辊以一定的载荷对圆锯片的两个表面进行加压;与此同时,由电机驱动一个或两个压辊转动,带动圆锯片旋转,使辊压区材料产生屈服变形,从而在它的两面形成一道浅压痕,实现适张。

辊压适张是一种易于控制的适张方法。它具有适张效果稳定、操作简单的优点,克服了锤击适张对操作技能要求高、适张效果不稳定的缺点,使得这种适张方法曾

经被许多国家所采用 (Schajer and Mote, 1984)。

辊压适张时辊压带通常为环形。理论分析和实验验证表明,以辊压带为分界线,在辊压带内侧,切向应力为压应力,其值从辊压带向内逐渐增大;辊压带外侧,切向应力为拉应力,其值向外迅速减小。这种适张预应力场存在一定缺点,即最大切向拉应力没有出现在锯片的外缘,并且反复辊压同一辊压带,会使锯片的强度和刚度大大降低,特别是针对超薄圆锯片的辊压适张,上述问题更加突出,成为制约辊压适张工艺进一步发展的瓶颈 (Li et al., 2015a)。

(三) 喷丸适张处理

喷丸适张是一种用于锯片生产线的新方法,它的机理与锤击和辊压一样。如图 1-3 所示的喷丸适张装置,圆锯片安装在喷丸装置前一个可旋转的垂直支座上。圆锯片的内外圈分别用挡板遮住,挡板间形成一个环状的区域,圆锯片绕支座以 10r/min 的速度旋转。金属丸流射向锯片击打未遮住的区域,使之发生均匀的塑性变形,从而使整个锯片获得对称分布的适张应力状态。整个喷丸硬化过程仅需 5min。在金属喷丸的作用下,锯片内环区处于压应力状态,外环区获得切向拉应力。

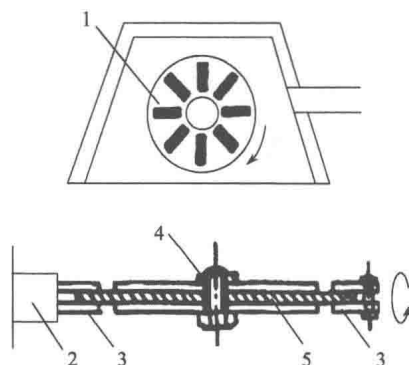


图 1-3 圆锯片喷丸适张装置示意图

1. 喷丸硬化装置; 2. 支座; 3. 外挡环;
4. 内挡环; 5. 圆锯片

喷丸适张对操作技能要求较低,并且也能达到与辊压适张相同的处理效果。喷丸适张一般是在锯片平整前进行,金属丸粒的击打痕迹可以在磨削锯片时清除,不会影响锯片外观,而辊压适张会在锯片表面产生压痕,影响锯片外观,在这一点上喷丸适张比辊压适张更具优势。但是,由于对它的研究还不够深入,工艺也不太成熟,加之难以再适张,目前这种方法还未被普遍采用 (李博等, 2015)。

(四) 定向热处理适张

圆锯片定向热处理适张也是锯片流水线生产中的一个工艺过程,它的优点是锯片的适张处理不再是单独的工序,可以在锯片材料进行热处理过程中完成。定向热处理适张的方法是将锯片加热到一定温度后,从锯片的中心部分向外部冷却,从而使锯片外缘部分获得拉应力,而内缘部分处于压应力状态。

这种冷却设备如图 1-4 所示。首先采用容易准确控制加热温度、加热效果不受锯片厚度影响的高频加热方法来加热锯片,然后用一对开有很多径向槽的夹盘夹住锯片进行回火冷却处理。为了先冷却锯片的中心部分,必须让冷却液从夹盘中心轴中流出,并沿着夹盘的径向槽从锯片中心向外缘冷却锯片。当冷却完成后锯片的热

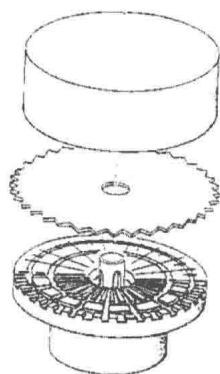


图 1-4 圆锯片定向热处理适张示意图

处理适张就完成了。

热处理适张方法省去了圆锯片流水生产线中适张的工艺环节，减少了加工工序，提高了圆锯片生产的自动化程度和生产效率。但热处理适张需要增加部分设备，需要控制冷却液流速、流量、温度等工艺参数，因此目前尚处在试验研究阶段。

(五) 在线温控加热适张

圆锯片在线温控加热适张机理与热处理适张相同，都是向锯片内部引入合理的热应力来改变锯片的工作应力状态。温控加热适张是一种在线动态加热适张过程，即在圆锯片进行切削过程中通过温度反馈动态控制锯片中心部分温度高于外缘部分温度一定数值，从而达到适张的目的。

在线温控加热适张的试验系统构成如图 1-5 所示，该系统由位移传感器、红外测温仪、开关式的感应加热器、温差调节器、电磁传感器、产品厚度调节器、磁带

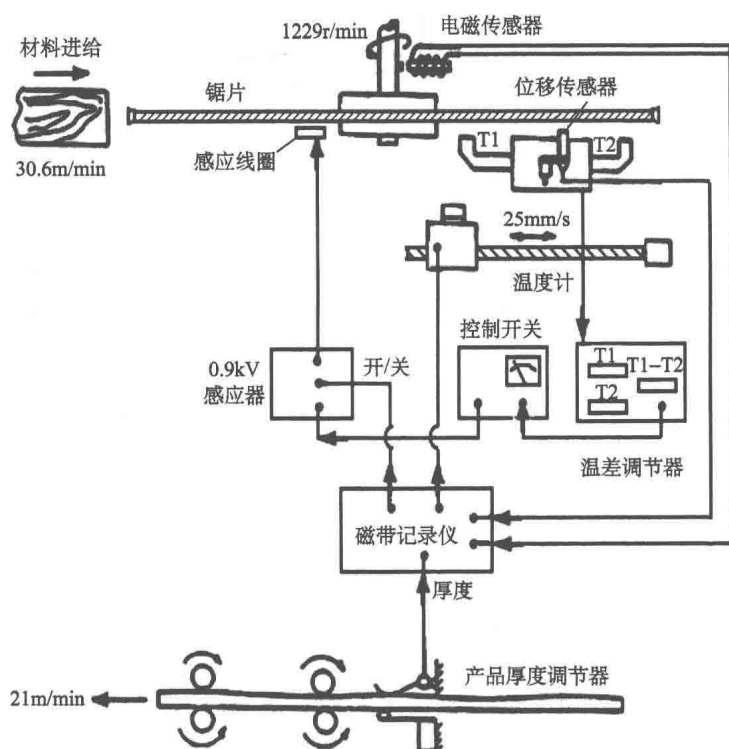


图 1-5 圆锯片温控适张处理试验系统示意图