

编者按: 依托“十二五”国家科技支撑计划、林业科学技术推广等项目, 中国林业科学研究院木材工业研究所进行了木材大功率微波处理技术的研究与系列产品开发, 经产学研联合攻关, 突破了木材微波处理效果调控的技术瓶颈, 取得了“微波膨化木材制备技术”成果, 开发了“微波膨化木”“微波膨化木装饰表板实木复合地板”等新产品。本刊于2020年系列报道相关研究的成果。

高场强微波处理木材仿真分析与装备三维实体设计

熊令明^{1,2}, 徐恩光¹, 林兰英¹, 周永东¹, 傅峰¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 南京三乐微波技术发展有限公司, 江苏南京 210037)

摘要: 高场强微波处理装备可用于木材干燥及木材预处理, 为木材阻燃、改性等功能化加工提供设备基础。应用电磁场仿真软件 CST 及三维建模 Creo2.0 软件, 进行微波木材预处理的电磁场仿真分析与装备三维建模设计, 为实际物理样机制造提供依据。

关键词: 微波设备; 木材; 预处理; 三维设计; 仿真分析

中图分类号: S781.7; TS64; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2020) 03-0001-05

Simulation and 3D-Design of High-intensity Microwave Equipment for Wood Pre-treatment

XIONG Ling-ming^{1, 2}, XU En-guang¹, LIN Lan-ying¹, ZHOU Yong-dong¹, FU Feng¹

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

2. Nanjing Sanle Microwave Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: High-intensity microwave equipment is widely used for wood treatment before drying and modification. Using CST and Creo2.0 software, electromagnetic field simulation was analyzed, and a three-dimensional (3D) model was developed. The results provided a basis for prototype manufacturing.

Key words: microwave equipment; wood; pre-treatment; 3D design; simulation analysis

高场强微波处理木材可以打开木材内部通道, 提高木材内部的渗透性^[1-2], 为速生人工林木材的高

附加值利用开辟新径。近年来, 中国林业科学研究院木材工业研究所和东北林业大学等单位开展了高场强微波处理木材装备及技术的探索性研究^[3-5], 面临的诸多问题中, 最主要的是微波谐振腔场强的均匀性^[6]。

随着计算机应用技术的发展, 其在可行性论证、微波工程设计等方面发挥了重要的作用。CST 软件作为高性能电磁场仿真软件, 主要应用于微波电磁场的仿真分析, 如对高场强微波处理木材装备进行加热腔内部电磁场的仿真分析^[7]; Creo2.0 为通用的

收稿日期: 2019-12-04; 修改日期: 2020-03-24

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划“木质隔声和发热新材料制造关键技术与示范”(2015BAD14B04); 国家林草局林业科技成果推广计划项目“基于高能微波处理的节材高效利用技术”(2019J42 号); 浙江省与中国林业科学研究院省院合作林业科技项目“大功率微波膨化重组装饰材料制备技术研究及示范”(2017SY15)。

作者简介: 熊令明 (1988—), 男, 博士研究生。Email: xiongliming219@163.com

责任作者: 林兰英, 女, 副研究员。Email: linly@caf.ac.cn

三维建模软件,主要用于机械设备类的三维实体建模。笔者结合应用 CST 软件和 Creo2.0 软件,对高场强微波处理木材装备进行仿真分析和三维实体建模,并根据仿真结果,解决微波谐振腔场强均匀性问题,从而完成高场强微波处理木材装备的三维设计模型,为物理样机制造提供技术依据^[8-11]。

1 微波处理木材装备的工作原理与设计思路

1.1 工作原理

方形木材首先通过进料装置进行定位输送,再穿过物料空腔抑制装置。当木材通过微波热风耦合腔时,高场强的微波能和热风同时对木材进行加热,从而破坏木材内部微观结构,打开或增加木材内部的通道,提高木材的渗透性。处理结束后,木材经出料装置运输至下一道工序。

1.2 设计思路

根据木材含水率与介电常数之间的关系,利用 CST 软件对微波处理木材进行仿真分析,再根据仿真结果,设计微波谐振腔部分;应用 Creo2.0 软件对谐振腔部分进行三维建模,并对整个高场强微波处理木材装备进行各部件的三维建模与总体装配。

根据加工对象以及产能等因素的要求,设定处理木材的最大截面尺寸为 220 mm×120 mm,长度≥1 000 mm,进给速度为 0.6~6 m/min,微波输出功率为 200 kW,热风温度需达到 130 °C 恒温。

2 微波处理木材仿真分析

高场强微波处理木材时,在满足最大截面木材能被微波完全穿透的前提下,微波谐振腔尺寸设计宜适中。谐振腔尺寸过大,会使谐振腔中微波的场强密度下降,影响微波对木材的穿透深度,试材中

心部位得不到微波辐射;反之,过小尺寸的谐振腔会加强微波各个馈口的反射,从而影响整个微波系统的运行。上述两个问题,需通过微波馈口的结构形式及放置形式来解决。

设备采用的微波频率为 915 MHz,其标准传输接口为 BJ9 波导形式,横截面积为 248 mm×124 mm,为了确保试材被穿透,根据试材的形状特征,从谐振腔四面进行微波能量的馈入,四个馈口结构相同,但馈入角度及功率不同。

根据微波穿透深度公式^[8],穿透深度与微波场强的平方成正比,缩小微波传输接口进行微波能量的馈入,可保证木材微波谐振腔内部的场强密度。故将微波谐振腔的左右馈口输入功率设为 75 kW,上下馈口的输入功率设为 25 kW。

为了减少馈口之间的互耦情况产生,将四个微波馈口以垂直极化的方式布置,相对的馈口均成 90° 分布,相邻的馈口均成 45° 分布。这种微波耦合腔中的馈口结构,可保证微波单一的场强模式,从而形成一段高场强微波单模加热腔,使得馈口之间的互耦降到最低,加热效率更高。

利用 CST 软件,对 200 kW 微波能作用下穿透木材的情况进行微波场的仿真分析,并经介电常数测试平台测量木材介电特性。含水率 40% 时木材的介电常数为 4.85,损耗角正切值为 0.2,木材在高密度场微波谐振加热腔中,X、Y、Z 轴上的场强分布剖面如图 1 所示。

从图 1 可以看出,木材已被微波完全穿透,且谐振腔中的场强密度分布在 100~150 v/m 范围内,均匀性较好。微波处理同一木材的穿透深度只与微波功率、场强密度有关,馈口的排布方式降低了馈口的反射和馈口之间的互耦影响。

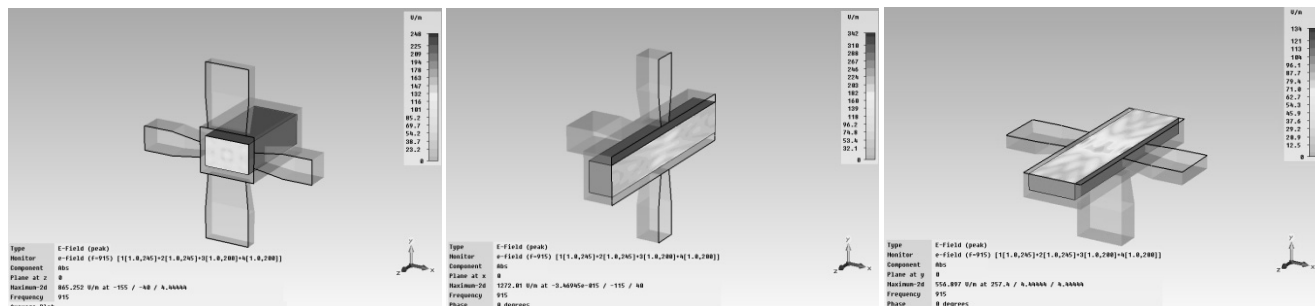


图1 木材在微波谐振加热腔中 X、Y、Z 轴上的场强分布

Fig.1 Schematic diagram of wood intensity distribution inside microwave resonant cavity in X, Y and Z triaxial forces

图2为谐振腔中馈口 45° 时的馈口反射图。S1、S2、S3、S4分别代表其四个馈口的反射值， Er 为试材的相对介电常数值。每个馈口的反射数值在微波加热过程中随 Er 值的变化而改变，但各个馈口反射数据均 <10 dB值，从而确保微波尽量被木材吸收，泄漏量较少、反射较少。但由于CST软件的局限性，只能对电磁场分布进行仿真，并不能对在电磁场中木材的破坏程度进行仿真，仿真结果只适合作为谐振腔的结构设计与装备设计的理论依据。

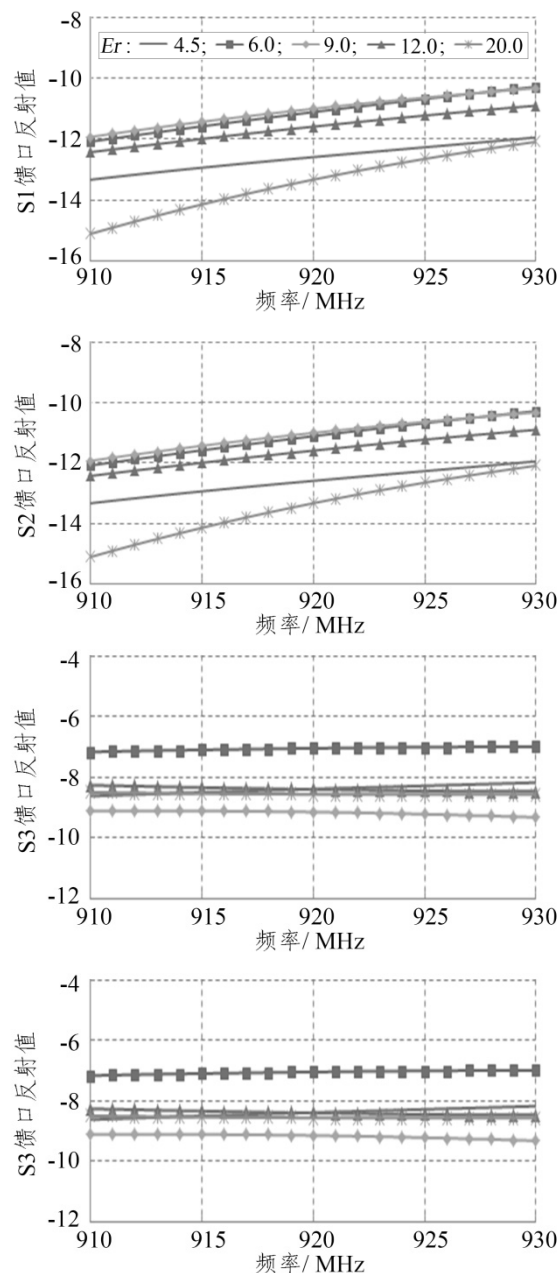
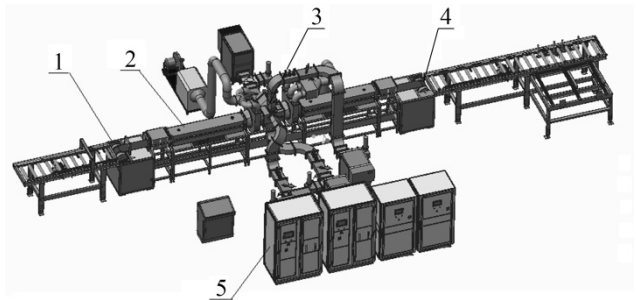


图2 微波谐振腔中 45° 馈口的反射值
Fig.2 Reflectance diagram of feed port at 45° in microwave resonant cavity

3 高场强微波处理木材装备的三维设计

图3为高场强微波处理木材装备的总体三维设计模型，主要由进料装置、物料空载抑制装置、微波热风耦合装置、出料装置、微波传输系统五部分组成。



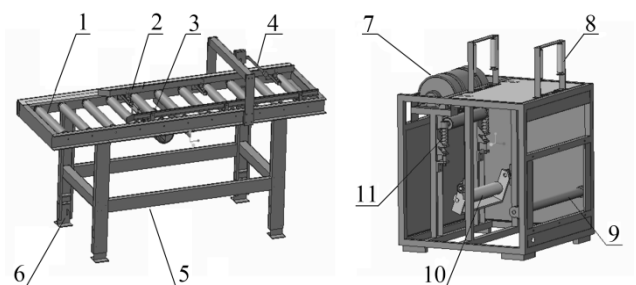
1. 进料端总装置; 2. 物料空载抑制装置; 3. 微波热风耦合装置;
4. 出料端总装置; 5. 微波传输系统

图3 微波处理装备总体三维模型设计

Fig.3 Schematic diagram of 3D model of a microwave equipment

3.1 进料装置

进料装置由前端送料段及后端输料段两部分组成（图4），两段运输物料的方式不同。前端送料段确保木材能自动安全地进入到后端输料装置，后端输料段除了将木材送入到物料空载抑制装置外，还应利用与送料段之间的速度差将木材自动排列，确保木材在谐振腔加热过程中不会出现断料现象。



1. 辊筒; 2. 靠山; 3. 电机; 4. 压块; 5. 机架; 6. 调节机构;
7. 胶辊; 8. 双向限位机构; 9. 支撑托辊;
10. 重锤装置; 11. 压紧装置

图4 进料端总装置

Fig.4 Schematic diagram of feeding device

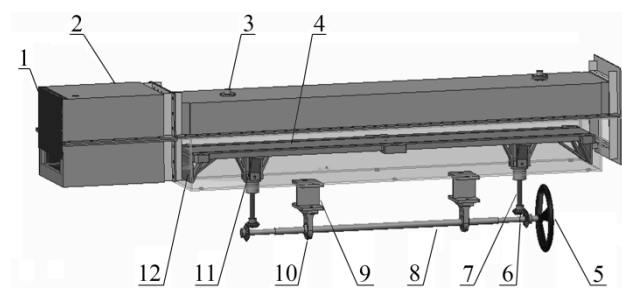
如图4所示，送料段采用辊轮运输方式，其中辊筒1有一定倾角，使木材在运送过程中一直贴着靠山2前行；压块4防止木材在运送过程中出现翘

头的现象；通过调节机构6，可与输料段进行高度上的匹配。

后端输料段采用传送带传输，其中胶辊7可增加木料与传送带之间的摩擦力；在后端输料段的双定向限位机构8，可防止木材在进入设备前发生倾斜；输料段还通过压紧装置11，增大传送带与胶辊之间的包角；重锤装置10使传输带处于拉紧状态，确保不会出现因传送带松弛而使木材无法前进的情况。

3.2 物料空载抑制装置

物料空载抑制装置如图5所示，不仅满足不同尺寸木材的运输，还能利用木材本身作为负载，吸收泄漏出的微波能。为满足微波泄漏国家标准限制 $\leq 5 \text{ mW/cm}^2$ 的要求，根据仿真结果，其反射值较小，表明在谐振腔中的微波能量较高，所以在该装置末端配置一段水套组合和金属帘，可以吸收及遮挡微波的泄漏。



1. 钢丝毛刷；2. 水套装置；3. 测温探头座；4. 四氟支撑板；
5. 手轮；6. 锥齿轮；7. 空载轴；8. 水平旋转轴；9. 水平轴支撑；
10. 标准UCP轴承座；11. 物料空载机构；12. 加强筋

图5 物料空载抑制装置

Fig.5 Schematic diagram of material lifting and microwave leak device

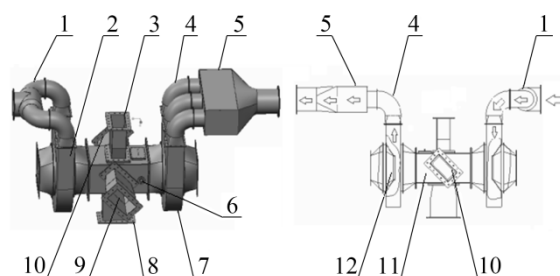
木材经软质金属帘1进入水套组合2，并随传送带传输至物料空载装置。空载装置配有两处测温探头3，用于实时监测木材在微波加热过程中的温度情况，四氟支撑板4用于支撑木材在2 m长空载抑制段的运行。

整个抑制空载装置放置于机架钢板上，水平轴支撑9一端固定于钢板，另一端则固定于标准UCP轴承座10。通过手轮5转动水平旋转轴8，同时锥齿轮6随着转动，从而带动空载轴7进行转动。两处的空载轴为相反螺旋形式，各自通过梯形螺纹固定于物料空载机构11中。

物料空载机构11中配有四个支座和限位装置，可根据木材尺寸自由调节高度并限位，从而使木材能在安全的限位范围内运行并能承受木材重量。加强筋12可防止设备在长时间运行过程中，物料空载抑制装置出现弯曲。

3.3 微波热风耦合装置

微波热风耦合装置如图6所示，主要包括微波耦合腔和高温热风装置两部分。



1. 鼓风机T型口；2. 鼓风机主机；3. 谐振腔上馈口；
4. 转换圆接口；5. 集气箱；6. 测温组合；7. 引风机主机；
8. 谐振腔下馈口；9. 谐振腔右馈口；10. 谐振腔左馈口；
11. 谐振腔；12. 挡风板

图6 微波热风耦合装置

Fig.6 Schematic diagram of hot air and microwave coupling device

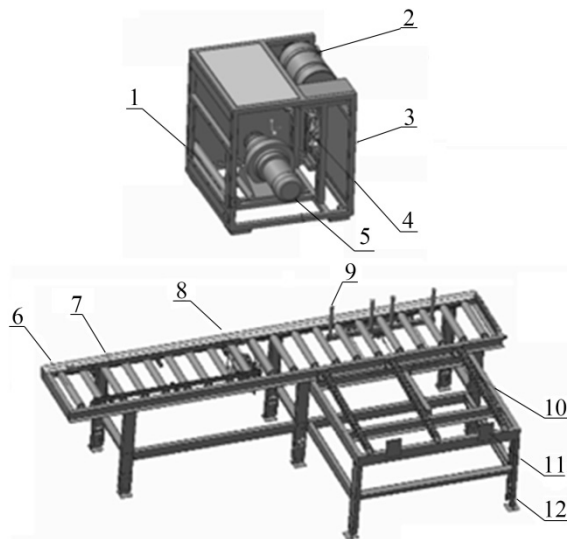
微波热风耦合装置是整套装备的核心部件，根据仿真结果，设计出高场强微波处理木材的最大截面尺寸为220 mm×120 mm，微波输出功率为200 kW，木材四周的热风温度需达到130℃、风速达到10 m/s。微波耦合腔中的馈口形式布置及功率布置，按照前述仿真结果进行。

在高温热风装置中，热风通过鼓风机T型接口1进入到鼓风机主机2中，通过挡风板12均匀进入到谐振腔11中；鼓风机T型接口的另一端则接入恒温恒压风机，通过变频器控制，保持恒温恒压风机的出风量和温度不变。

进出热风装置分别安装在高密度场谐振腔的两侧，一端为鼓风结构形式，另一端则为引风结构形式。集气箱5一端接入转换圆接口4，另一端则接入一台引风机。根据风速和风量的要求，设计引风机主机7。从谐振腔进入的热风，经引风机通过挡风板12及引风机主机7引出，从而保证谐振腔中木材四周的风量相同，风速达到10 m/s。整个微波热风耦合装置的热风流动方向，如图6中箭头所示。

3.4 出料装置

出料装置主要由物料动力输送装置和物料输出装置组成,如图7所示。



1. 支撑托辊组合; 2. 胶辊; 3. 机架; 4. 压紧滚筒组合;
5. 摆线针轮减速电机; 6. 动力辊轮; 7. 出料靠山; 8. 电机;
9. 气缸推杆; 10. 出料滚轮; 11. 出料挡板; 12. 调节机构

图7 出料端总装置

Fig.7 Schematic diagram of output carrier

利用物料动力输送装置与物料输出装置两者之间的速度差,出料装置将处理木材顺利运出,并确保木材不会出现卡料现象;物料动力输送装置主要由摆线针轮减速电机5通过链条带动胶辊2进行转动,从而通过压紧滚筒组合4增大传送带和胶辊之间的包角;支撑托辊组合1则支撑着返程的传送带运行。

物料输出装置的传输形式为辊筒传动,通过电机8带动各动力辊轮6进行转动;7为出料靠山,木材从动力输送装置输出后进入到物料输出装置中,在行至末端处时,检查信号受阻碍,从而利用气缸将木材横向推动到出料滚轮10中。出料滚轮10存在一定的角度,木材可随着自身的重力滑下,最终由出料挡板11挡住,进入到下一道生产工序。调节机构12调节整个物料输出装置,确保与物料动力输送装置高度的一致。

3.5 微波传输系统

微波传输系统主要由微波控制柜、微波发生器、环形器、水负载、双定向耦合器、BJ9波导等组成,确保微波稳定传输及微波系统的安全性。

4 结语

研究的高场强微波处理木材装备,可处理最大的截面尺寸为220 mm×120 mm,长度≥1 000 mm的木材,生产效率高,且符合地板坯料的尺寸要求。应用CST软件对高场强微波处理木材加热腔内部电磁场的仿真分析结果,及应用Creo2.0软件对微波处理木材装备的三维实体建模,验证了高场强微波处理木材装备的合理性,解决了高场强微波处理木材均匀性问题,缩短了后期产品的加工周期。

虚拟仿真分析虽为高场强微波处理木材场强均匀性分析研究提供了参考,但由于仿真软件的缺陷,并未涉及木材本身的温度、含水率等参数的分析,得到的仿真数据与实际生产尚有一定差异,需进一步探究上述参数的影响,优化高场强微波处理木材的工艺。

参考文献:

- [1] 徐恩光,林兰英,李善明,彭立民,周永东,傅峰. 木材微波处理技术与应用进展[J]. 木材工业, 2020, 34(1): 20-24.
XU E G, LIN L Y, LI S M, PENG L M, ZHOU Y D, FU F. Wood microwave treatment technology and its applications[J]. China Wood Industry, 2020, 34(1): 20-24.
- [2] 王婧. 微波预处理对尾叶桉人工林木材干燥特性的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [3] 李贤军,孙伟圣,周涛,等. 微波处理中木材内温度分布的数学模拟[J]. 林业科学, 2012, 48(3): 117-121.
LI X J, SUN W S, ZHOU T, et al. Mathematical modeling of temperature profiles in wood during microwave heating[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(3): 117-121.
- [4] 周志芳,江涛,王清文. 高强度微波处理对落叶松木材力学性质的影响[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(2): 7-8.
ZHOU Z F, JIANG T, WANG Q W. Influence of intensive microwave treatment on mechanical properties of larch wood[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007, 35(2): 7-8.
- [5] 周永东, Torgovinkov G, Vinden P, 等. 微波预处理加速阔叶材干燥的技术分析[J]. 木材工业, 2011, 25(1): 23-25.
ZHOU Y D, TORGOVINKOV G, VINDEN P, et al. Technological analysis of microwave pre-treatment for fast drying of hardwood[J]. China Wood Industry, 2011, 25(1): 23-25.
- [6] 罗勇锋,李羲,李贤军,等. 木材微波预处理圆柱形谐振腔理论模拟与设计[J]. 林业科学, 2014, 50(3): 117-122.
LUO Y F, LI X, LI X J, et al. Mathematical simulation and design of cylindrical cavity of microwave pretreatment equipment used for wood modification[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(3): 117-122.
- [7] 肖辉. 微波处理樟子松木材机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [8] 陈抗生. 电磁场理论与微波工程基础[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2009.
- [9] 顾继慧. 微波技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] David M. Pozar. 微波工程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [11] 詹友刚. CREO2.0 宝典[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.

(本文编校 向 琴)