



硕士学位论文

核桃干燥时裂纹与干燥特性参数间关系的多因素试验研究

**Multi-factor experimental investigation of the relationship
between cracking and drying characteristics parameters during
walnut drying**

姓 名 贾梦迪
学 号 20720717
导 师 曹成茂（教授）
专 业 农业工程
研究方向 农机智能检测技术
学 院 工学院

2023年6月

中图分类号: S226.4 单位代码: 10364
UDC: 621 密 级:

安徽农业大学 硕士学位论文

核桃干燥时裂纹与干燥特性参数间关系的多 因素试验研究

**Multi-factor experimental investigation of the relationship
between cracking and drying characteristics parameters during
walnut drying**

姓 名: 贾梦迪 学 号: 20720717

学 科 门 类: 工学 导 师: 曹成茂 教授

专业名称: 农业工程 研究方 向: 农机智能检测技术

学 院: 工学院 答辩委员会主席:

论文评阅人:

2023年6月

A Dissertation Submitted to Anhui Agricultural University
in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Master of[Science/Agriculture/etc.]

Multi-factor experimental investigation of the
relationship between cracking and drying
characteristics parameters during walnut drying

by

[Jia Mengdi]

Supervised by

[Professor Cao Chengmao]

Majored in

[Agricultural Engineering]

[June, 2023]

[Anhui Agricultural University / School of Engineering]
Hefei, Anhui, P.R.China

摘要

为获得核桃在干燥过程中干燥特性对核桃壳裂纹的影响，基于课题组已有研究和前人研究，将实验与深度学习相结合，对于裂纹与核桃干燥特性参数间关系进行多因素分析研究，具体内容如下：

(1) 确定较优加工方式。通过查阅文献和原产地实际调研，为解决裂纹方向和数目随机的问题，基于手工短口钳破壳方法，选则先预制裂纹后加热干燥的方法实现控制裂纹扩展。对多种预制裂纹和干燥方式进行对比实验，得出最佳的预制裂纹方式为五角星冲孔和六角星冲孔，干燥方式为近红外热风干燥。

(2) 设计制作核桃干燥信息采集系统。为实时监控核桃干燥过程中的核桃各部分含水率、壳内外温度以及环境温度等信息，设计并搭建了干燥实时信号采集系统，首次实现实时监测含水率的过程中，在预设含水率时提示取样，且不造成含水率监测中断。

(3) 设计制作核桃裂纹信息采集系统。为实现对核桃裂纹的识别，采用 Early Stopping 和 Dropout 等正则化方法，使用 YOLO v8、SSD 和 Faster R-CNN 算法，对图像采集系统所采集的裂纹数据进行训练，YOLO v8 表现出最佳的识别效果，并利用该算法识别获得核桃裂纹数量。

(4) 裂纹与干燥特性参数间关系研究。为探究核桃近红外热风干燥特性参数对裂纹的影响，对尺寸筛选后的核桃进行干燥实验，并利用设计的信息采集平台对于干燥后核桃的裂纹信息以及含水率等进行采集；构建含水率拟合模型、有效水分扩散系数模型等，得到了核桃干燥速率和温度变化规律；分析干燥参数对裂纹数量产生影响的机理，提出了适用于山核桃破壳的预制裂纹方式为六角星冲孔；对应存储干燥和熟制干燥两种需求，得出能获得最多裂纹的加工参数为近红外热风恒温 83℃下干燥至含水率 0.295% 和 173℃下干燥至含水率 0.319%。

关键词：山核桃；干燥特性；深度学习；预制裂纹

ABSTRACT

In order to investigate the impact of drying characteristics on walnut shell cracks during the drying process, this study combines experimental methods with deep learning techniques based on previous research conducted by the research team and other scholars. The study focuses on analyzing the relationship between cracks and parameters related to walnut drying characteristics using a multifactorial analysis approach. The specific details of the study are as follows:

(1) Determination of optimal processing method. Through literature review and actual research in the origin, to solve the problem of random crack direction and number, based on the manual short-jaw pincer shell breaking method, the method of prefabricated cracking and then heating and drying was selected to achieve the control of crack expansion. A variety of prefabricated cracking and drying methods were compared and experimented, and the best prefabricated cracking method was pentagram punching and hexagram punching, and the drying method was NIR(Near-Infrared) hot air drying.

(2) Design and production of walnut drying information collection system. In order to real-time monitor the information of moisture content of walnut parts, temperature inside and outside the shell and ambient temperature during the drying of walnut, a real-time signal acquisition system for drying was designed and built to realize the process of real-time monitoring of moisture content for the first time, prompting sampling at preset moisture content and not causing interruption of moisture content monitoring.

(3) Design and production of walnut crack information collection system. To achieve the recognition of walnut cracks, regularization methods such as Early Stopping and Dropout are used to train the crack data collected by the image acquisition system using YOLO v8, SSD and Faster R-CNN algorithms, and YOLO v8 shows the best recognition effect. In addition, the number of walnut cracks obtained using this algorithm recognition was integrated with the drying characteristics parameters to obtain the relationship between them.

(4) Study of the relationship between cracking and drying characteristics parameters. To explore the influence of near-infrared hot air drying characteristic parameters on walnut cracks, drying experiments were conducted on size-selected walnuts. The crack information and moisture content of the dried walnuts were collected using the designed information collection platform. A moisture content fitting model and effective moisture diffusion coefficient model were constructed, and the drying rate and temperature change law of

walnuts were obtained. By analyzing the mechanism of the influence of drying parameters on the number of cracks, the prefabricated cracking method applicable to pecan shell breaking is proposed as hexagonal star punching. Corresponding to both storage drying and cooked drying requirements, the processing parameters that yielded the most cracks were drying to a moisture content of 0.295% at a NIR hot air constant temperature of 83°C and drying to a moisture content of 0.319% at 173°C.

KEYWORDS: Pecan; Drying characteristics; Deep learning; Precrack

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 坚果破壳研究现状.....	3
1.2.2 坚果干燥研究现状.....	3
1.2.3 裂纹缺陷检测研究现状.....	4
1.2.4 裂纹与干燥特性参数间关系研究现状	5
1.3 研究内容及技术路线.....	5
1.3.1 研究目标.....	5
1.3.2 研究内容.....	6
1.3.3 技术路线.....	6
1.4 本章小结	8
第二章 核桃干燥实时信号采集系统	9
2.1 系统硬件结构.....	9
2.1.1 系统总体结构.....	9
2.1.2 机械结构.....	10
2.1.3 硬件结构.....	13
2.1.4 电器柜布置与连接.....	17
2.2 系统运行方式.....	18
2.2.1 系统控制流程.....	18
2.2.2 质量换算过程.....	18
2.3 结果与讨论.....	19
2.4 本章小结	19
第三章 核桃裂纹信息采集系统	20
3.1 系统硬件设计.....	20
3.1.1 系统总体结构.....	20
3.1.2 外框架	21
3.1.3 四自由度机械框爪.....	22
3.1.4 摄像系统.....	22
3.1.5 系统运行方式.....	24
3.2 深度学习裂纹目标检测.....	24
3.2.1 目标检测工具库.....	24
3.2.2 算法介绍.....	25
3.2.3 制作数据集.....	28

3.2.4 训练算法.....	30
3.2.5 算法评估指标.....	30
3.3 结果与讨论.....	30
3.3.1 最优算法对比及结果.....	30
3.3.2 算法性能比较.....	30
3.4 本章小结.....	32
第四章 冲孔形状和干燥方式优化	33
4.1 材料与设备.....	33
4.1.1 实验材料.....	33
4.1.2 实验设备.....	33
4.2 实验方法.....	33
4.2.1 浸泡干燥实验.....	33
4.2.2 力学实验.....	35
4.3 结果与讨论.....	35
4.3.1 冲孔形状对裂纹产生的影响.....	35
4.3.2 干燥方式对裂纹产生的影响.....	36
4.3.3 冲孔力测量结果.....	38
4.4 本章小结.....	38
第五章 山核桃近红外热风干燥特性研究	39
5.1 材料与设备.....	39
5.1.1 实验材料.....	39
5.1.2 实验设备.....	39
5.2 实验方法.....	40
5.2.1 实验流程.....	40
5.2.2 样品制备	41
5.2.3 干燥实验	41
5.3 研究方法.....	43
5.3.1 数据处理.....	43
5.3.2 信号处理.....	43
5.3.3 干燥特性参数计算.....	44
5.3.4 有效水分扩散系数计算.....	46
5.3.5 数学模型建立与分析方法.....	48
5.4 结果与讨论.....	50
5.4.1 山核桃干燥各参数间关系.....	50
5.4.2 含水率拟合模型.....	52
5.4.3 有效水分扩散系数模型.....	57
5.4.4 干燥速率.....	59
5.4.5 温度变化规律.....	61

5.4.6 裂纹数与干燥方式以及冲孔形状之间关系	63
5.4.7 裂纹数与含水率之间关系.....	65
5.5 本章小结.....	66
第六章 结论与展望	67
6.1 结论.....	67
6.2 展望.....	68
参考文献.....	69

插图清单

图 1-1 宁国山核桃加工流程.....	1
图 1-2 人工短口钳开壳法.....	2
图 1-3 总体技术路线图.....	7
图 2-1 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台总体图.....	10
图 2-2 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台	11
图 2-3 支架式信号采集机械结构	12
图 2-4 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台的定制配件.....	12
图 2-5 电器柜布置图.....	17
图 2-6 控制系统流程图.....	18
图 3-1 图像采集系统总体图.....	20
图 3-2 图像采集系统外框架.....	21
图 3-3 图像采集系统.....	21
图 3-4 图像采集系统机械爪.....	22
图 3-5 SSD 模型结构.....	25
图 3-6 Faster R-CNN 模型结构.....	26
图 3-7 山核桃数据集图片批处理效果.....	29
图 3-8 裂纹目标检测标注示意图.....	29
图 3-9 不同算法裂纹识别效果图.....	31
图 4-1 冲孔形状.....	34
图 4-2 破壳裂纹区域划分	34
图 4-3 冲孔力测量实验现场图.....	35
图 4-4 不同冲孔形状和干燥状态下山核桃裂纹表现.....	35
图 4-5 预制裂纹指标.....	36
图 4-6 干燥方式指标.....	37
图 4-7 五角星和六角星批头冲孔力	38
图 5-1 山核桃手动冲孔台剖面图和三维图.....	39
图 5-2 实验流程示意图.....	40

图 5-3 三个热电阻与核桃相对位置示意图.....	42
图 5-4 山核桃在干燥瓶中冷却.....	42
图 5-5 壳仁分离检测后标号收纳.....	43
图 5-6 173°C实测重量记录.....	43
图 5-7 山核桃质量变化曲线滤波效果图.....	44
图 5-8 山核桃结构示意图.....	46
图 5-9 山核桃各干燥参数间矩阵散点图.....	50
图 5-10 最优干燥动力学模型拟合曲线.....	57
图 5-11 有效水分扩散系数.....	59
图 5-12 湿基含水率和干基含水率变化速率.....	60
图 5-13 7种不同温度下空气、壳、仁温度记录.....	61
图 5-14 温度曲线平滑处理效果图.....	61
图 5-15 空气、壳、仁升温阶段温度变化曲线.....	62
图 5-16 空气、壳、仁恒温阶段温度变化曲线.....	63
图 5-17 不同类型裂纹分布小提琴图.....	64
图 5-18 不同类型裂纹数量与干基含水率之间关系.....	65

附表清单

表 1-1 人工短口钳开壳法特点.....	2
表 2-1 采集卡参数	13
表 2-2 拉压传感器参数表.....	13
表 2-3 拉压传感器变送器参数表.....	14
表 2-4 温度传感器参数表.....	15
表 2-5 温度变送器参数表.....	15
表 2-6 湿湿度传感器参数表	16
表 2-7 蜂鸣器参数表.....	17
表 3-1 摄像头参数	23
表 3-2 相机参数	23
表 3-3 三种算法在测试集上的检测精度和推理速度	30
表 5-1 因素-水平表	41
表 5-2 山核桃几何物理参数	46
表 5-3 12 个干燥曲线数学模型	48
表 5-4 热风(HA)43°C条件下核桃含水率最优数据分析结果	52
表 5-5 红外热风(IA)43°C条件下核桃含水率最优数据分析结果	53
表 5-6 红外热风(IA)53°C条件下核桃含水率最优数据分析结果	53
表 5-7 红外热风(IA)83°C条件下核桃含水率最优数据分析结果	54
表 5-8 红外热风(IA)113°C条件下核桃含水率最优数据分析结果	54
表 5-9 红外热风(IA)143°C条件下核桃含水率最优数据分析结果	55
表 5-10 红外热风(IA)173°C条件下核桃含水率最优数据分析结果	55
表 5-11 12 种模型的核桃含水率最优数据分析结果	56
表 5-12 有效水分扩散系数拟合参数	58

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

核桃属于胡桃科植物，与腰果、杏仁和榛子并称世界著名“四大干果”^[1]。核桃仁富含营养物，如蛋白质、不饱和脂肪酸、维生素和纤维素^[2]，对人体健康有益^[3]。

宁国山核桃是宁国市的特产，目前宁国山核桃的栽植面积居安徽省第1位、总产量居全国第2位^[4]，产业发展中直接受益人数近10万人^[5]。作为中国最早认定的“中国山核桃之乡”^[6]，山核桃产业已成为宁国市农业支柱型产业^[7]。然而，如图1-1所示，宁国市进行核桃加工的基础设施相对落后，同时，随着农村劳动力的减少，劳务成本也将继续攀升，因此需要投入更多的资源来改善生产力和效率^[8]。

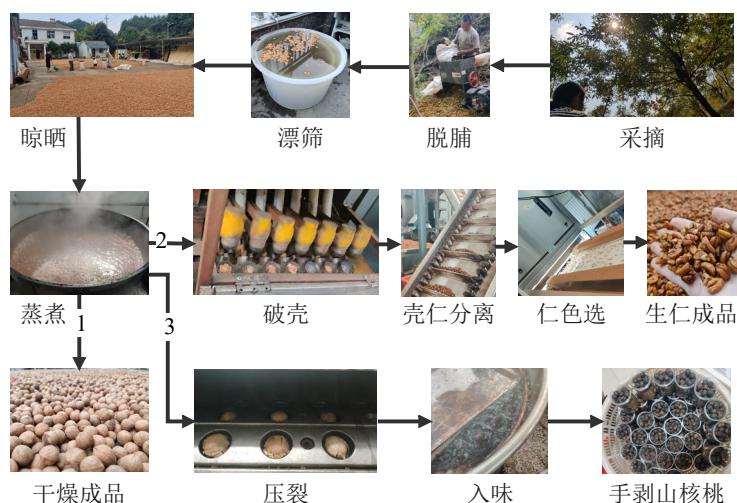


图 1-1 宁国山核桃加工流程

Fig. 1-1 Ningguo pecan processing process

课题组对于核桃干燥及加工过程进行了部分研究^[9, 10]，成功申请并完成国家自然科学基金项目《低损伤目标下热固耦合坚果类破壳机理及机构优化研究》（项目号：51475002），实现了山核桃全程机械自动化生产与智能化分选^[11-13]。但目前核桃破壳设备存在破壳率低、果仁损伤率高等问题，且尽管国内外学者在山核桃机械化破壳的研究方面已有大量工作^[14-16]，但更多的研究关注的是如何在破壳过程中降低能量消耗，而忽略了如何保持果仁的完整性。故申请了国家自然科学基金面上项目《冲击与振动条件下核桃破壳裂纹的形成与扩展机理研究》（项目号：5207052308），以期找到利于壳仁分离且果仁损伤小的裂纹产生与扩展的可控方式，为破壳取仁机的优化设计提供理论依据，解决制约核桃破壳装备的关键瓶颈难题。

不同的破壳方式会影响到仁的完整率和壳仁分离的难度，进而影响山核桃的食用价值和经济效益^[17]。核桃壳主要由木质素和半纤维素组成，质地坚硬，外观不规则^[18]。此外，不同核桃的大小差异很大，壳和核之间有复杂的隔膜连接，壳和核的间隙很小^[19]，这些因素使得核桃壳与核仁难以完全分离，因此很难达到较高的完整出仁率。

以往核桃破壳过程中，裂纹产生方向多为随机，横隔木难以通过破壳手段与外壳分离，因此仁与壳的嵌合紧密度无法降低。经山核桃原产地以及网络调研，发现当地的一种短口钳剥法，此方法整仁率和破壳速度更优，如图 1-2 所示，该方法主要分为 3 步。为进一步阐释该方法，表 1-1 总结了该方法的操作方式及其效果。



图 1-2 人工短口钳开壳法

Fig. 1-2 Artificial short mouth pliers shell opening method

表 1-1 人工短口钳开壳法特点

Tab. 1-1 Features of artificial short mouth pliers shell opening method

步骤	操作方法	效果
1	纵向沿缝合线剪切核桃尖端	核桃沿缝合线分为两半
2	纵向剪切核桃尖端中间	半扇核桃沿横隔木分为两半
3	沿横轴方向多点剪切横隔木与壳交界处	横隔木分离，壳沿横向断裂，仁无损完整脱落
	重复方法 2、3	四瓣核桃仁完整分离

分析此方法，认为此方法与以往破壳形式的最大不同之处有三点，一是裂纹扩展方向可控，裂纹必定沿剪切方向扩展；二是精准的制造了沿横隔木的纵向裂纹，使得仁与横隔木相邻的内侧平面可以暴露；三是可产生大量沿横轴方向的裂纹，横向裂纹有助于横隔木与壳之间的分离。故控制预制裂纹的位置和方向可提高破壳率。

初步获得裂纹后，还需使裂纹进一步扩展、联通，外壳才能分离脱落。传统机械二次破壳法由于破壳力和外壳形变量难以控制，易造成仁的损伤。而加工过程中，必经的浸泡和烘烤可使原有裂纹得到明显的扩展，并产生新裂纹，且加热产生的内应力相比于机械外力，避免了壳和仁之间的碰撞，可大大降低对仁的损伤。

综上，通过特定位置和方向的预制裂纹，配合干燥工艺，可实现核桃裂纹方向和数量的可控调节。本研究通过实验优化预制裂纹和干燥处理核桃的方式，并进一步探明裂纹与干燥特性参数间数量关系，为坚果破壳设备研制提供最佳参数。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 坚果破壳研究现状

国内外对于坚果破壳研究目前主要集中在以下几个方面：

(1) 机理研究：国内外学者如郑霞等研究了坚果破壳的物理和化学机理，对于温度、水分、压力等因素对于坚果破壳的影响进行探究，另外还对坚果破壳过程中壳壁的变形和断裂机理等进行阐释^[20-25]。沈柳杨等对于不同的受力形式的影响进行了研究，目前核桃破壳形式主要可分为挤压式^[26]、撞击式^[12, 27]及气爆式^[28]。

(2) 模拟仿真：采用数值模拟和计算机仿真的方法，模拟坚果破壳过程中的力学和物理变化，以及壳壁的断裂和形变等情况是研究学者常用方法^[26, 29]，通过仿真模拟的方法可以更好的对于破壳过程的机理进行阐明，有利于机理探究。

(3) 设备开发：设计开发用于坚果破壳的机械设备和工艺流程，研究坚果破壳的最佳工艺条件和最适设备参数^[12, 30-34]。

1.2.2 坚果干燥研究现状

坚果干燥是影响破壳率和破损率的重要因素之一，近年来，国内外对坚果干燥的研究不断深入。

在干燥方法方面，传统的自然风干和太阳晒干逐渐被烘干、真空干燥、微波干燥等现代干燥技术所替代^[35, 36]，Fazia Taj 等首次研究了由 MCD 技术公司 Tacomafor 发明的折射窗(RW, refractance window)干燥法，即一种以薄膜为基础的，在相对较低温度下干燥核桃仁的技术^[37]。同时，研究人员还关注了坚果在干燥过程中的质量变化，如颜色、香味、营养成分等的变化^[38-40]。一些研究也探讨了干燥参数对坚果品质的影响^[41, 42]。

在干燥动力学模型方面，常用的模型有 Page 模型、Logarithmic 模型、Henderson-Pabis 模型等^[43, 44]。这些模型可以用来预测坚果在不同干燥条件下的含水率随时间的变化。

在有效水分扩散系数模型方面，研究者多采用 Fick 扩散方程和 Fick-Knudsen 扩散方程等经典扩散理论建立模型。同时，也有学者结合机理模型和实验数据拟合建立有效水分扩散系数模型^[45, 46]，进一步的，这种方法可以更准确地预测坚果干燥过程中的水分迁移。

有限元模拟分析方面，有研究人员对核桃的干燥过程进行了模拟，得到了一系列干燥特性参数，并与实际干燥数据进行了对比，与实验数据吻合良好，为改进核桃干燥工艺和确定适宜的的干燥条件奠定了理论基础^[47]。

综上可知，以往对核桃热风干燥的研究，通常将其视为各向同性的整体。但实际上，鲜核桃是一种典型的多层次结构物料，果仁由吸湿的果壳包裹，且鲜核桃具有不同的物化特性，忽略这些因素对干燥过程的影响是不符合实际情况的^[48-50]。因此，需要进一步研究具有异质结构的核桃热风干燥特性，分别研究核桃整体、核桃壳以及核桃仁各部分在干燥过程中的含水率情况、干燥速率以及温度变化等，所获得的结果更符合实际情况，所以能够为实际应用和设备开发提供更可靠借鉴意义。此外，目前对于干燥过程中物料含水率实时监测的设备开发还比较有限，大部分设备在取出物料进行含水率检测时，会中断干燥过程，从而引入实验误差，所以对于物料干燥过程中含水率等信息的实时监测设备的研究还值得探索。

1.2.3 裂纹缺陷检测研究现状

食品裂纹缺陷检测是食品行业中重要的品质控制环节，主要应用于各类食品中如饼干、面包、糖果、水果、谷物等的裂纹缺陷检测。目前，国内外的研究主要集中在以下几个方面：

视觉方法：基于计算机视觉的裂纹检测方法是目前最常用的方法之一^[51]，主要包括基于图像处理算法^[52]的方法和基于机器学习算法^[53]的方法。例如，基于边缘检测、形态学处理、图像分割等图像处理方法，结合支持向量机（SVM）、神经网络等机器学习算法进行裂纹缺陷检测。

声学方法：声学方法是近年来出现的裂纹缺陷检测方法之一，主要是利用超声波等声学技术对食品进行检测。例如，利用超声波传感器对不同类型的食品进行检测，利用超声波信号处理算法提取裂纹特征，实现裂纹缺陷检测^[54]。

光学方法：光学方法主要是利用激光光源和光学传感器对食品进行检测，如利用激光干涉仪对表面裂纹进行检测^[55]、利用激光散斑干涉仪对玉米^[56]、大豆等颗粒物料表面缺陷进行检测^[57]。

压缩感知方法：压缩感知法可以在少量的测量中提取信号的稀疏特征，从而实现信号的重构和分析^[58]。该方法在食品裂纹检测中也有广泛的应用，例如基于压缩感知理论的苹果裂纹检测方法^[59]。

气味检测方法：气味检测是一种新兴的食品品质检测方法，可以通过电子鼻等设备对食品气味进行检测，从而判断食品品质^[60, 61]。该方法在食品裂纹缺陷检测中也有一定的应用，如利用电子鼻技术对农产品中的裂纹进行检测^[62]。

综上所述，国内外研究对于各类实验材料的缺陷检测进行了机器视觉和深度学习方法进行了大量研究，但是还未能充分应用于实际中，这也说明该方法应用在核桃裂纹的识别上还有探索空间。

1.2.4 裂纹与干燥特性参数间关系研究现状

国内外通过加工和热处理的方法，探索裂纹与干燥特性参数间关系，以达到控制裂纹产生的研究目标。这些方法主要涉及材料的加工工艺和热处理条件的优化，通过调控材料的微观结构和应力状态，以影响裂纹的形成和扩展行为。以下是国内外在这一领域的研究成果和方法：

加工参数优化：研究者通过调节加工参数，如变形速率、温度和冷却速率等^[63]，控制材料的内部应力分布，从而减少裂纹的形成^[64-66]。例如，通过优化变形速率，可以改善材料的断裂韧性和抗裂纹扩展性能^[67, 68]。

热机械处理：研究者将加工和热处理相结合，通过热机械处理的方法，探索裂纹与干燥特性参数的关系^[69-71]。例如，通过热拉伸、热冲击等热机械加载方式，调节材料的应变和应力状态，影响裂纹的行为^[72]。

晶体塑性理论：国内外的研究者基于晶体塑性理论^[73]，结合实验和数值模拟，研究裂纹行为与材料的干燥特性参数之间的关系^[74]。通过模拟材料的位错运动、晶体变形和裂纹扩展过程，揭示了干燥条件对裂纹形成的影响机制^[75, 76]。

植物材料(木、竹)断裂力学：国内学者邵卓平致力于木竹断裂特性的研究，研究了材料(木、竹)的强韧性机理和断裂破坏行为，研究领域涉及木材顺纹理断裂、木材横纹理断裂、木材构造的力学特征及应力应变关系、木材损伤断裂过程的声发射特性分析与 Felicity 效应、木材裂尖应力场的有竹结构的力学特征与组分力学性质、限元分析和开裂方向预测、竹材的层间断裂性质以及竹材横向断裂的物理模型与能量吸收机制^[77]。

通过上述研究方法，国内外的学者和工程师探索了加工和热处理对裂纹产生的调控策略，从而实现对裂纹产生的控制。但此类研究多应用于对裂纹的预测以及减少裂纹，而非增加裂纹数量，可见探索裂纹与干燥特性参数间关系，以达到促进核桃裂纹产生具有创新性和应用意义。

1.3 研究内容及技术路线

1.3.1 研究目标

研究旨在寻找可控的裂纹产生和扩展方案，以促进壳仁分离并减少果仁损伤，为优化破壳取仁机器设计提供理论支持，解决核桃破壳装备面临的关键难题。通过对比不同预制裂纹方式、不同干燥方式，确定较优加工方法。为研究使用此加工方法的过程中，干燥条件下热固耦合裂纹扩展规律，设计图像采集系统和干燥信息采集平台，综合监测干燥过程中裂纹信息与干燥特性参数，进而分析得出较优加工方法的具体工艺参数。

1.3.2 研究内容

(1) 冲孔形状和干燥方式的选择

通过实验，对比了十字型、五角星型和六角星型冲孔对于裂纹形成的影响，确定较优冲孔形状。并且通过浸泡、干燥实验对比了真空、红外、热风等不同干燥方式对于裂纹数量的影响情况，确定较优干燥方法。

(2) 核桃干燥信息采集平台设计

设计并搭建了核桃干燥信息采集平台，分别从环境温湿度及核桃含水率相关参数两方面，采集山核桃加热过程中的各项指标，用以进一步的对比分析，以期得到裂纹扩展参数和食品干燥参数之间的规律。

(3) 核桃裂纹信息采集平台设计

设计并搭建了核桃裂纹信息采集平台，使用采集到的图像，训练深度学习模型，实现山核桃裂纹目标检测。使用训练好的模型，统计裂纹数量。

(4) 山核桃近红外热风干燥特性研究

基于已通过前述实验确定的冲孔形状和干燥方法，利用设计和搭建的信息采集系统，对于核桃采用近红外热风系统进行干燥的过程中的裂纹、干燥特性参数等信息进行采集，综合对比数据，寻找规律，提出有利于产生裂纹的工业加工参数。

1.3.3 技术路线

本研究技术路线如图 1-3 所示。

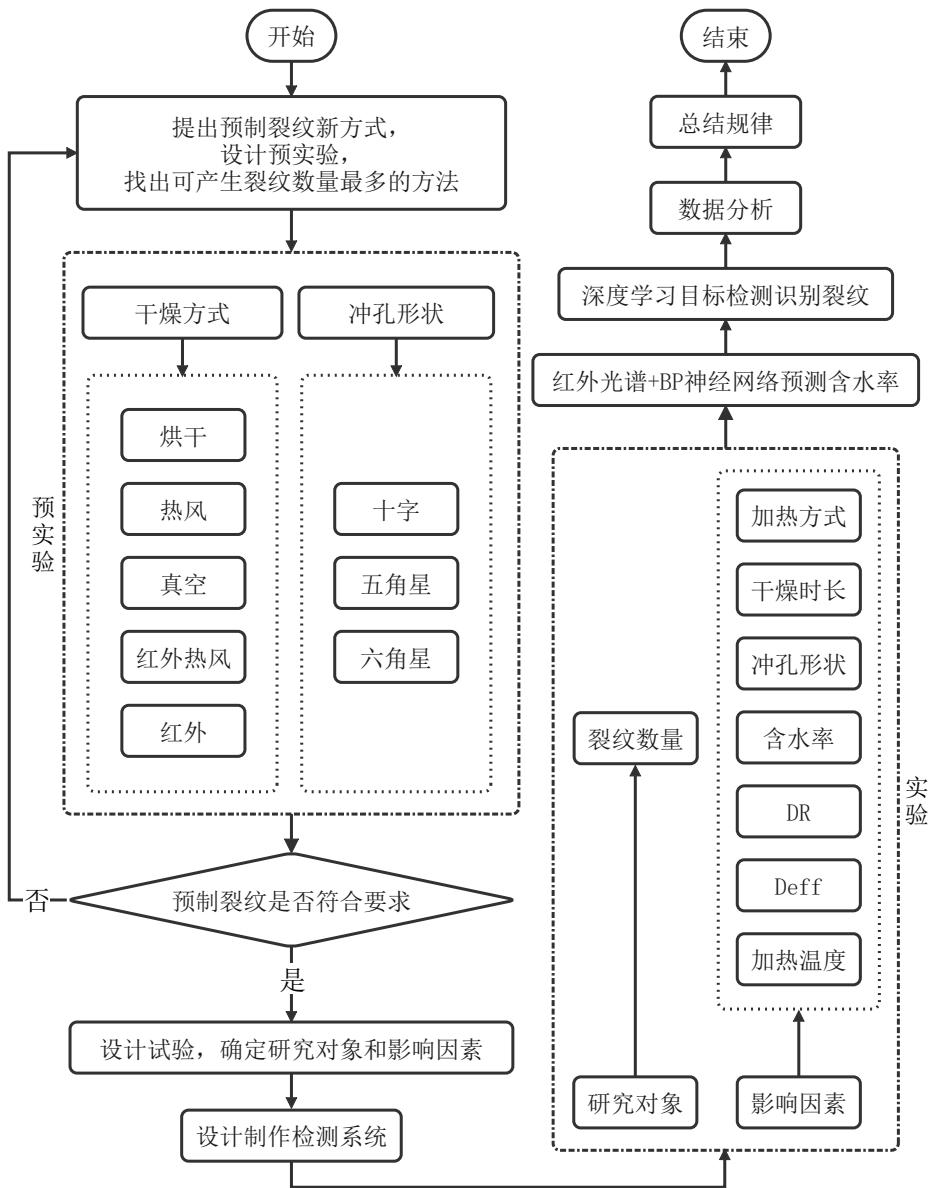


图 1-3 总体技术路线图

Fig. 1-3 Roadmap of Overall Technology

本文首先查阅相关资料，了解课题的研究背景及意义，找到研究目标和研究内容，并制定合适的研究技术路线。然后去原产地全程跟进山核桃收获至加工，充分了解山核桃在各加工环节的表现；通过原产地农户以及网络搜索，充分了解民间各种核桃破壳方法。

根据调研结果，提出预制裂纹新方式，设计实验，对比不同预制裂纹方式、不同干燥方式，找出可产生符合条件裂纹数量最多的冲孔形状及加热方法。

为进一步确定裂纹变化机理以及破壳干燥工艺参数，运用找到的较优冲孔形状和加热方法，设计干燥实验，确定实验过程中需检测的物理量，设计制作对应的信息采集系统，并利用此系统进行干燥过程的实时数据采集。

分析数据，总结核桃干燥时裂纹与干燥特性参数间关系，揭示冲孔和加热条件下热固耦合裂纹扩展对破壳的影响机理，得到冲孔形状、加热温度、加热时间等最优工艺参数，获得壳仁分离且果仁损伤小的裂纹产生与扩展的可控方式。

1.4 本章小结

通过查阅相关文献，了解国内外坚果破壳装备和裂纹研究的现状和方法，结合断裂理论以及课题组研究基础，发现研究多边形冲孔形状和干燥方式产生的裂纹对破壳有一定指导意义。参考国内外研究方法，制定研究思路和方案。

第二章 核桃干燥实时信号采集系统

已有研究将核桃壳内假设为具有均匀各向同性物理性质的实心球体，对核桃的干燥特性进行了模拟^[78]，类似于对豌豆^[79]、水稻^[80]和开心果^[81]的建模研究。而核桃具有壳和核，为典型的多层结构，化学成分和物理性质不同^[49, 82]。在核桃干燥过程中，综合监测壳内外以及环境温度、核桃含水率等信息，并探究其和裂纹数量之间的定量关系还未有人探究。

因此，基于已由前述实验优化的冲孔形状以及近红外热风干燥方式，本研究搭建了核桃干燥实时信号采集系统，采集山核桃加热过程中的各项指标，用以进一步的对比分析，以期得到裂纹扩展参数和食品干燥参数之间的规律。

2.1 系统硬件结构

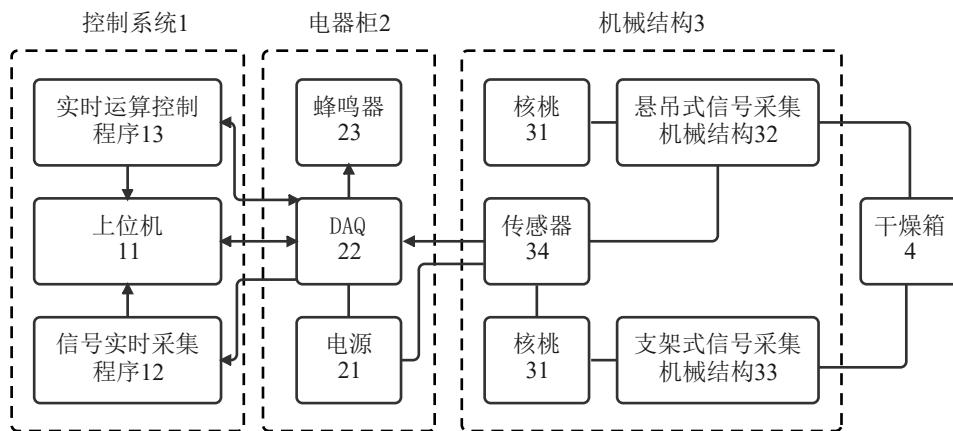
在农产品领干燥领域，传统地面平铺晾晒方法会让农产品地面停留很长时间，这增加了昆虫和微生物污染的可能性；用于存储物料的干燥方式和用于熟制物料的干燥方式多缺乏理论指导，加热温度和加热时间多依靠工人经验，易导致农产品营养成分受损；其中干燥导致的裂纹更加不可控，种子类物料应避免产生裂纹以免影响萌发，需破壳取仁的物料需要尽量多的裂纹以提高后续破壳流程的效率。

现有在售仪器的检测方案中，在售的颗粒物含水率测定仪器，多使用压力称重传感器，单次干燥过程只可测定被测对象初始放入状态时的含水率，并记录干燥过程中的含水率变化曲线，但干燥过程不可中断，故而干燥过程中，物料不同时间点理化性质的变化不可被取出检测。张晨等在研究中设计使用了 S 型梁式称重传感器，需每隔 20min 取出样本。以上方法均不能做到可根据需要人为设定含水率，在核桃含水率达到不同指定值时，提醒操作人员取出对应干燥状态的部分核桃。因此，对尺寸为 250 mm (L) × 250 mm (W) × 250mm (H) 的实验室红外干燥箱进行改造，以更好满足研究的信息采集需求。

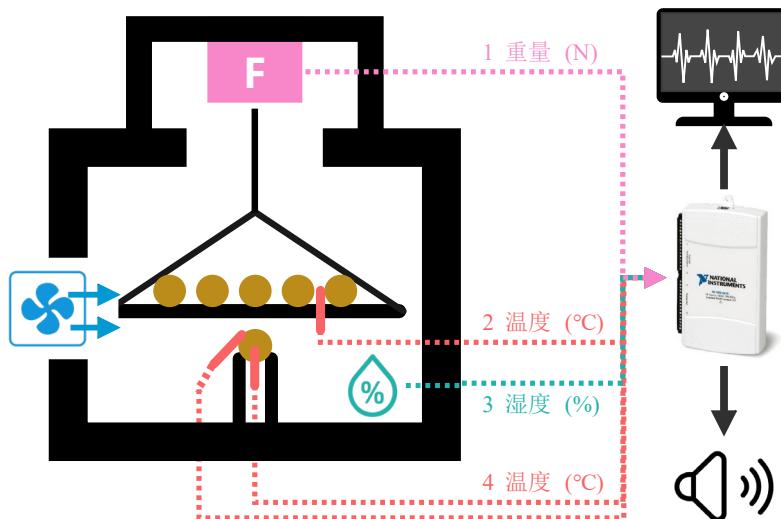
2.1.1 系统总体结构

该系统的控制原理图和示意图如图 2-1 所示，主要包括控制系统，电器柜以及机械结构以及干燥箱四个部分。控制系统包括上位机及其上安装的信号实时采集程序和实时运算控制程序，信号实时采集程序和实时运算控制程序均与上位机双向通讯；电器柜包括 DAQ、电源和蜂鸣器；机械结构包括传感器、悬吊式信号采集机械结构、支架式信号采集机械结构及其上放置的核桃，传感器包括拉压传感器、温度传感器、湿度传感器，三个传感器与单片机的输入端连接，蜂鸣器与单片机的输出端连接；悬吊式信号采集机械结构、支架式信号采集机械结构均与干燥箱连接，悬吊式信号

采集机械结构与拉压传感器连接，支架式信号采集机械结构上的核桃与温度传感器、湿度传感器连接。采用 100PT 型热电阻测量样品温度，样品的重量变化可以手动或自动测量并利用拉压传感器自动测量并记录重量变化以及温湿度传感器实时测量环境温湿度变化。所有数据由 DAQ (Data Acquisition) 连续监测和记录。



(a) 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台系统控制原理图



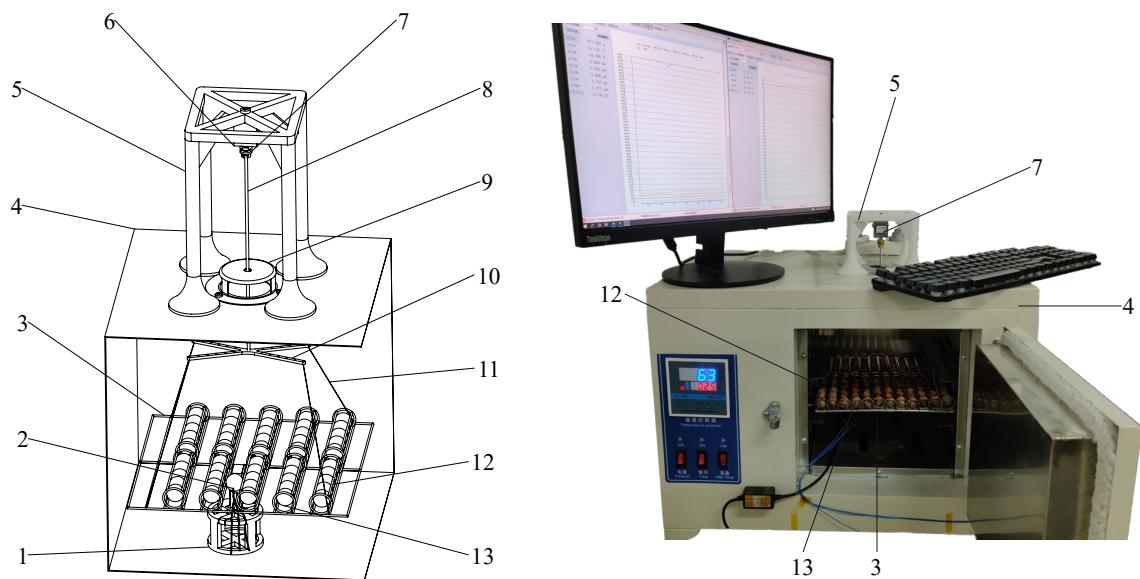
(b) 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台示意图

图 2-1 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台总体图

Fig. 2-1 Schematic diagram of image acquisition system

2.1.2 机械结构

(1) 悬吊式信号采集机械结构



(1、支架式信号采集机械结构；2、温度传感器；3、托盘；4、干燥箱；5、悬吊架；6、拉压传感器；7、悬吊连接件；8、承重螺丝；9、导流板；10、悬吊叉；11、悬吊丝；12、分组笼；13、核桃)

图 2-2 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台

Fig. 2-2 Suspended walnut drying real-time signal acquisition platform

如图 2-2 所示，核桃每 5 个一组，置于金属笼内，多个金属笼放置于托盘上，托盘四角通过悬吊丝与悬吊叉连接。

其中悬吊叉上等距排列有多个孔，可用于穿过悬吊丝，从而定位悬吊丝位置，以此达到改变悬吊丝角度的目的，从而根据不同大小的物料改变悬吊丝角度，避免相互干涉以及提高悬吊稳定性。承重螺丝安装在悬吊叉的螺纹孔内，从而可改变悬吊叉和承重螺丝的相对位置，以此调节物料在干燥箱内的悬吊高度，以便适应于不同干燥箱以及多种物料及箱内实验环境。

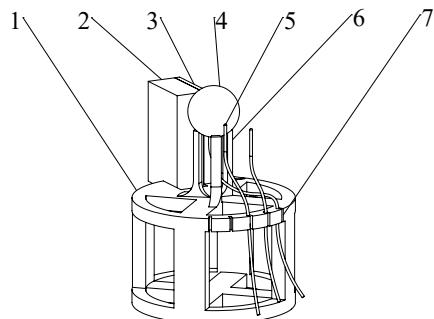
承重螺丝的螺丝头部可嵌入安装于悬吊连接件的下方的环形槽内，与环形槽下底面接触；悬吊连接件与拉压传感器通过螺丝连接，螺丝头部与悬吊连接件上方的环形槽螺丝连接，螺丝螺纹部分与拉压传感器螺纹孔连接。由于悬吊连接件环形槽留有开孔，故悬吊连接件上下两部分可快速手动分离，以满足实验时需要快速安装并开始检测的需求。

拉压传感器通过螺丝安装在悬吊架上，悬吊架固定于干燥箱外平面上，承重螺丝通过通风孔贯穿干燥箱内外，导流板安装在通风孔上方，可将箱内热空气从向上流动导引为水平流动，避免拉压传感器附近温度过高影响测量精度。

(2) 支架式信号采集机械结构

支架式信号采集机械结构如图 2-3 所示，安装于干燥箱内部底面，核桃位于核桃架上，支架高度经过设计，可保证核桃架上的核桃和干燥盘上的核桃位于同一水平面内，以此减小支架上核桃的相关测量值与干燥盘上核桃的差异，提高数据可信度。

湿度传感器安装于湿度传感器架上。温度传感器位通过卡线槽固定于支架式信号采集机械结构上，三个温度传感器分别与核桃仁、核桃壳外表面和附近空气接触，用于测量核桃仁、核桃壳外表面和附近空气的温度。



(1、底座；2、湿度传感器；3、湿度传感器架；4、核桃；5、温度传感器；6、核桃架；7、卡线槽)

图 2-3 支架式信号采集机械结构

Fig. 2-3 Bracket type signal acquisition mechanical structure

(3) 定制配件

如图 2-4 所示，定制配件包括分组笼、悬吊连接件和悬吊叉。其中分组笼材质为不锈钢，钢丝直径 2mm，采用焊接工艺制作。由于实验时，每次从干燥箱中拿出 5 个核桃，避免箱内温度波动过大，故需要需要快速一次性取出 5 个。同时分组器械不能大面积遮挡核桃与空气的接触面，进而影响核桃的干燥，故设计此四棱柱结构，实验时只需快速用镊子夹取一金属笼即可，取出后，核桃可通过一端圆形开口一次放入干燥瓶冷却，防止核桃样品对应标号混乱，从而可以追踪到每一个核桃的数据。

悬吊连接件和悬吊叉采用铝合金，由于使用拉压传感器，所悬吊的负重越轻，就可以选择越小的量程，对应测量精度越高，铝合金耐高温，质量轻，金属加工精度高，可承受本实验的拉压强度，故设计此两种零件作为传递拉压力的核心连接件。



(a)分组笼

(b)悬吊连接件

(c)悬吊叉

图 2-4 悬吊式核桃干燥实时信号采集平台的定制配件

Fig. 2-4 Customized accessories for suspended walnut drying real-time signal acquisition platform

2.1.3 硬件结构

(1) 采集卡选型

本实验对数据采集的需求是：长时间，高采样率，快速读写，可 Labview 编程，模拟输入端口大于 5 个，直流输出端口大于等于 1 个。

表 2-1 采集卡参数

Tab. 2-1 Parameter of acquisition card

元器件名	参数名称	技术指标
USB-6215DAQ	采样率	250Ks/s
	模拟输入	16 路
	模拟输出	2 路
	数字输入	4 路
	数字输出	4 路
可编程范围±0.2~±10V		

NI USB-6215 是一款总线供电带隔离的 M 系列多功能 DAQ 模块，在高采样率下也能保持高精度，且其为移动应用场景或空间上有限制的应用场合专门设计，非常适用于电器柜内安装，且方便取出连接电脑进行程序调试，表 2-1 为该采集卡的具体参数。其即插即用的安装最大程度地降低了配置和设置时间，同时它能直接与螺丝端子相连，从而削减了安装成本并简化了信号的连接。USB 总线供电使用户不再需要携带多余的外部电源。NI-DAQmx 驱动程序和测量服务软件提供了简单易用的配置和编程界面，DAQ Assistant 等功能可帮助用户缩短开发时间。以上所述性能，完全可满足本次实验设计的需求，故选用此 DAQ 作为数据采集模块。

(2) 拉压传感器选型

本传感器内部采用惠斯顿电桥原理，实验筛选的直径 20mm 山核桃，单个山核桃绝干质量约为 3.3g，含水率饱和时单个质量约为 4.05g，故单个核桃总失水量不大于 1.05g，若将整个干燥过程均分为 10 等份，按照实验设计，含水率每下降 1/10 则报警取出核桃，则需能够监测到单个核桃 0.105g 的质量变化。

表 2-2 拉压传感器参数表

Tab. 2-2 Tensile pressure sensor parameters

参数名称	技术指标	参数名称	技术指标
额定量程	0~1000g	输入阻抗	385±35Ω
灵敏度	1~2mv/V	输出阻抗	350±3Ω
综合精度	0. 05%F · S	绝缘阻抗	≥2000MΩ
蠕变	±0.03%F·S/30min	激励电压	5~12VDC

续表 2-2 拉压传感器参数表

Tab. 2-2 Tensile pressure sensor parameters

参数名称	技术指标	参数名称	技术指标
非线性	±0. 03%F • S	工作温度范围	-20~ + 70°C
滞后误差	±0. 03%F • S	允许过负荷	120%F•S
重复性误差	±0. 03%F • S	密封等级	IP65
零点温度系数	0.03%F • S/10°C	材质	不锈钢 (0.5~1kg 铝合金)
输出温度系数	±0. 03%F • S/10°C	线缆	Φ 3×2000mm

表 2-3 拉压传感器变送器参数表

Tab. 2-3 Tensile pressure sensor transmitter parameters

元器件名	参数名称	技术指标
BSQ-3	型号	JLBS-M2-1KG
	工作温度范围	- 10~55°C
	电缆尺寸	3×2m
	防护等级	IP65
	输入信号	mV 级电压信号
	输出信号	0~5V
	激励电压	10V/12V/15V/24V (DC)
	工作温度	-20~80°C
	输入线路数	4
	输出线路数	3 (红: 电源+; 绿: 电源-; 黄: 信号+)

由于本实验设计中单次取出一组 5 个核桃，故需能够监测到最多 $0.105 \times 5 \times 10 = 5.25\text{g}$ 、最少 $0.105 \times 5 \times 2 = 1.05\text{g}$ 质量变化。表 2-2 和表 2-3 为所选拉压传感器和拉压传感器变送器参数表，本传感器的最小可分辨质量精度为 $1000 \times 0.05 = 0.5\text{g}$ ，可满足实验需求。

(3) 温度传感器选型

本实验测量温度范围为 0-200°C，由于干燥箱内物料温度变化是缓慢的，故温度变化响应时间需要在 3s 以内，精度小于等于 1°C，且温度传感器需要测温端在干燥箱内，信号输出端在干燥箱外，故需要非常细的测温线且可承受不同干湿环境。

表 2-4 温度传感器参数表

Tab. 2-4 Temperature sensor parameter

元器件名	参数名称	技术指标
PT100	型号	KPS-CX-PT100
	封装方式	不锈钢钢管+防水环氧树脂
	外形规格	1.5*10mm*2m
	引线	三线制、接插针
	测量范围	-50-200°C
	精度	0.55°C
	测量范围	-200—550°C
	允许电流	≤5mA
	允许偏差值	±0.15+0.003 t (A 级)
	精度	0.1 摄氏度

表 2-5 温度变送器参数表

Tab. 2-5 Temperature transmitter parameter

元器件名	参数名称	技术指标
SBWZ-2280 变送器	型号	CY-019
	测量范围	-50-200°C
	传感器形式	三线制
	输入电压范围	0~10V
	输出范围	0-5v
	负载电阻	≤550Q
	传送方式	三线制
	基本误差	±0.2%
	工作电源电流	30mA (短路保护)
	工作电源电压	24V±0.5V (DC)

满足精度需求的包括 NTC 热敏电阻， RTD 铂热电阻和热电偶。其中，由于 NTC 热敏电阻响应速度较快，但易产生潮湿故障，非线性，且易自动加热影响精度，故排除；热电偶响应速度最快且测温线可做到 0.25mm 直径，但会因冷端补偿、非线性、稳定性会随时间变化等问题严重影响测量精度；RTD 铂热电阻各项参数满足条件，精度稳定性最高，响应时间最慢，但 3S 以内可满足测量需求，故选用 PT100 热电阻。各项参数如表 2-4 所示。PT100 热电阻感应温度后，会对温度信息转换为电压信号，因此需要变送器进行信号整合并传输至检监测系统，表 2-5 为所选变送器的具体参数。

(4) 湿度传感器选型

由于本实验环境温度会达到 100℃以上，且为农产品物料干燥实验，故需选取对环境适应性强的传感器。

表 2-6 温湿度传感器参数表

Tab. 2-6 Temperature and humidity sensor parameter

元器件名	参数名称	技术指标
温湿度传感器	型号	HTS40L-GX
	输入电压	3.3-24V DC
	测量范围	-40℃~120℃, 0%RH~100%RH
	测量精度	温度±0.3℃, 湿度±3%RH
	分辨率	0.1℃, 0.1%RH
	工作电流	0.9ma
	休眠电流	5ua
	电源防护	防反接, ±15KV 静电 ESD 浪涌保护
	485 防护	防接错线, ±15KV 静电 ESD 浪涌保护
	温湿度刷新时间	≥20ms
	通讯接口	RS485 MODBUS-RTU
	通讯距离	最远 2000 米
	线长	默认 1 米
	线序定义	红色 VCC, 黑色 GND, 黄色 A+, 绿色 B-
	波特率	1200、2400、4800、9600、14400、19200
	485 地址	1~255 可设置, 默认为 1
	节点数	最大 255 个

HTS40 L 系列传感器具有超小的体积，保护套采用铜烧结保护壳和 PE 防水保护壳，铜烧结保护壳通过铜颗粒烧结后镀镍，具有透气、耐高温、抗腐蚀等特点，提升传感器寿命，接线部分采用航空插头，可快速安装和拆卸；PE 防水保护壳采用高分子 PE 材料烧结滤芯，能够防水，滤除灰尘，对高速流动的气体起到缓冲的作用，测量温湿度的结果更平稳准确，适用于室外淋雨、高湿度农业大棚等环境，其参数如表 2-6 所示，故选用此温湿度传感器。

(5) 蜂鸣器选型

有源蜂鸣器的内部有震荡源，能够驱动蜂鸣器发声，振荡源有芯片、二极管、三极管等，所以，只要一通电就会发声。声音种类有连续声、间断声、报警声等。无源的蜂鸣器内部没有震荡源，所以，通电是不会发声的，必须有信号来驱动它，

才可以使其发声，声音频率可控。故有源蜂鸣器开发周期短，可直接接入 DAQ 输出端使用，如表 2-7 所示为其具体参数。

表 2-7 蜂鸣器参数表

Tab. 2-7 Buzzer parameter

元器件名	参数名称	技术指标
有源蜂鸣器	电压	3.5-5.5V
	频率	2300Hz 常响
	阻抗	无

2.1.4 电器柜布置与连接

电器柜如图 2-5 所示，采用 400*500*160 配电箱，放置于干燥箱和上位机之间，起到信号传递和处理的作用。

根据前述各部件选型结果，DAQ 采用 NI-USB-6215DAQ 型号，DAQ 的 15 连接拉压传感器，DAQ 的 17、19、21 脚连接 PT100 温度传感器、DAQ 的 24 脚连接湿度传感器、DAQ 的 12 脚连接蜂鸣器，三个 PT100 温度传感器分别位于干燥箱空气内、核桃壳外表面以及核桃仁内，湿度传感器位于干燥箱内部空气中。

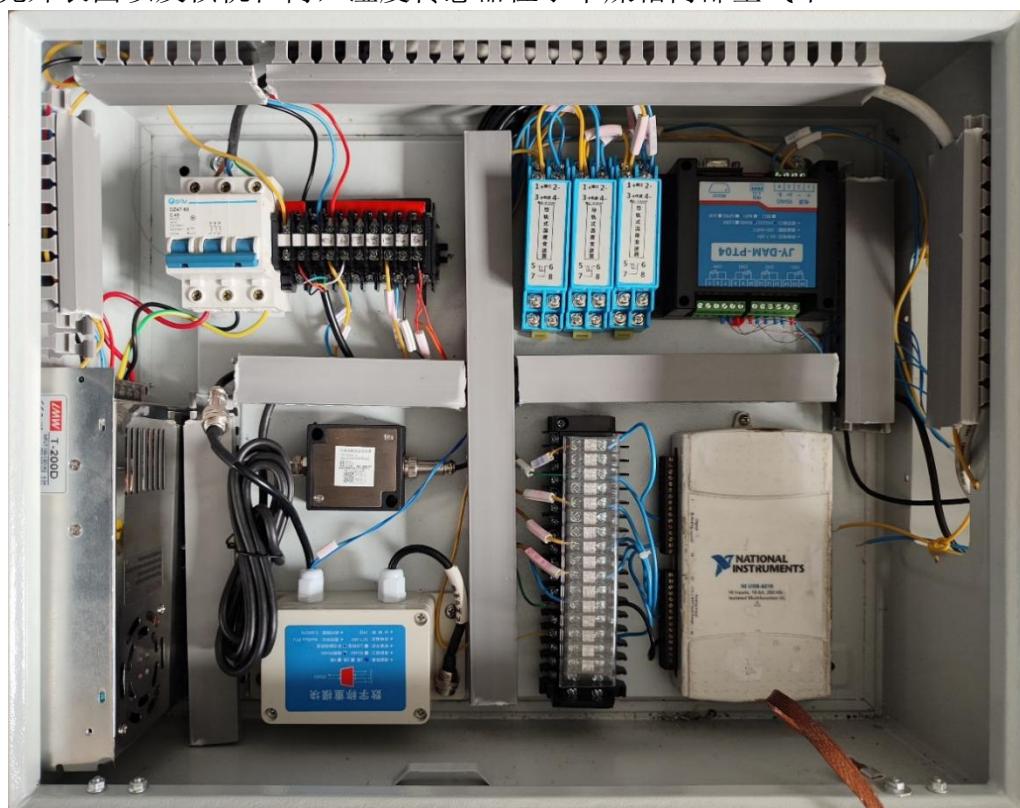


图 2-5 电器柜布置图

Fig. 2-5 Electrical cabinet arrangement diagram

2.2 系统运行方式

2.2.1 系统控制流程

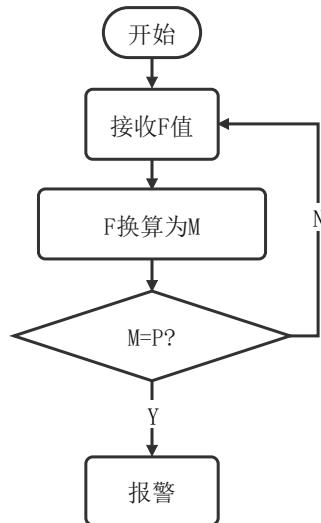


图 2-6 控制系统流程图

Fig. 2-6 Control system flow chart

系统运行时，DAQ 接收传感器发来的信号，并实时显示和保存在上位机上。如图 2-6 所示，DAQ 将接收到的重量信号 F 经过计算，得出核桃含水率 M，每当达到预设值 P 时，触发蜂鸣器报警，提醒操作人员取出此时间点的核桃样本，否则继续接收重量信号 F。

2.2.2 质量换算过程

已知常量中，设：

a=绝干单重,为 g (g)

b=组数,为 10 (组)

c=单个笼重,为 13.29201 (g)

d=每组核桃数,为 5 (个)

e=空盘+悬索+悬吊连接件(测值),为 181.8 (g)

f=初始重量 (测值) = (空盘+悬索+笼+湿核桃) , (g)

s=拉压传感器电压值(V)

以下对变量命名，设：

g=[湿核桃总重 (10 个测值)]

h=[湿核桃单重 (测值计算)]

k=单组湿核桃总重

l=单个核桃每采集点之间失水量

m =单组核桃每采集点之间失水量

n =湿核桃花单组总重

o =拿前损失总水分

p =拿出 n 第组前笼总重

q =拿前核桃总质量

r =拿前总重

t =实测受力值

设自变量:

$$\begin{cases} i = 1, i++, i \leq b \\ j = b, j--, j \geq 1 \end{cases} \quad (2-1)$$

则可列方程组:

$$\begin{cases} g = f - e - c * l \\ h = \frac{g}{b * 5} \\ k = h * 5 \\ l = h / a \\ m = j * 5 \\ n = h * d \\ o = j * m * i \\ p = c * j \\ q = k * j - o \\ r = q + p + e \\ t = \frac{s}{0.005} \\ t = ?r \end{cases} \quad (2-2)$$

通过上述公式，每次输入初始重量（测值） f ，即可快速求得拿前总重 r ，此时 r 值反映的是核桃花单次下降 $1/10$ 含水率时，称重传感器应测得的重量，将当前质量测值 t 与计算值 r 对比即可。

2.3 结果与讨论

设计并搭建了核桃花干燥信息采集平台，可实时采集环境温湿度及核桃花重量数据，首次实现实时监测含水率的过程中，在预设含水率时提示取样，且不造成含水率监测中断。采集所得数据可用于进一步换算为山核桃花加热过程中的各项干燥特性参数指标，用以进一步的对比分析，以期得到裂纹扩展参数和食品干燥参数之间的规律。

2.4 本章小结

本章针对本研究信息需求，对核桃花综合信息采集平台的各个系统部分进行设计，并且通过各部件选型，搭建了核桃花干燥实时信号采集系统，该部分是对核桃花干燥过程的信号进行采集，以便阶段性对核桃花取出进行后续信息采集。

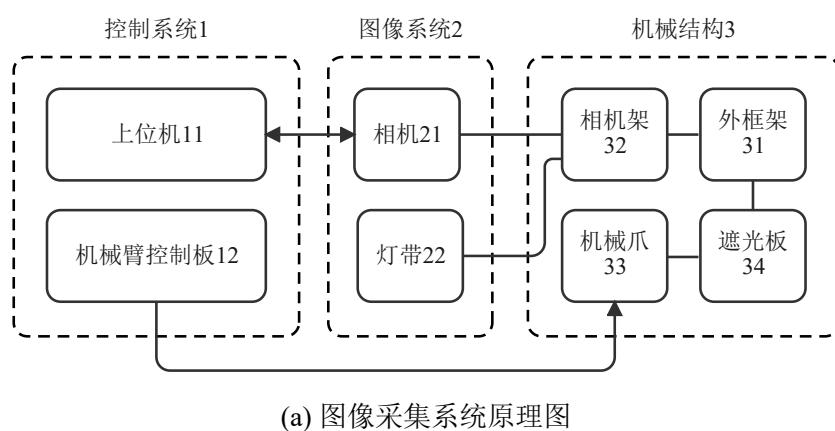
第三章 核桃裂纹信息采集系统

由于山核桃为球体，单张照片难以完整记录裂纹信息，且本实验需要采集上百个山核桃裂纹信息，故需要一套图像采集系统，可自动记录核桃全视角裂纹信息，并对裂纹种类和数量识别和统计。

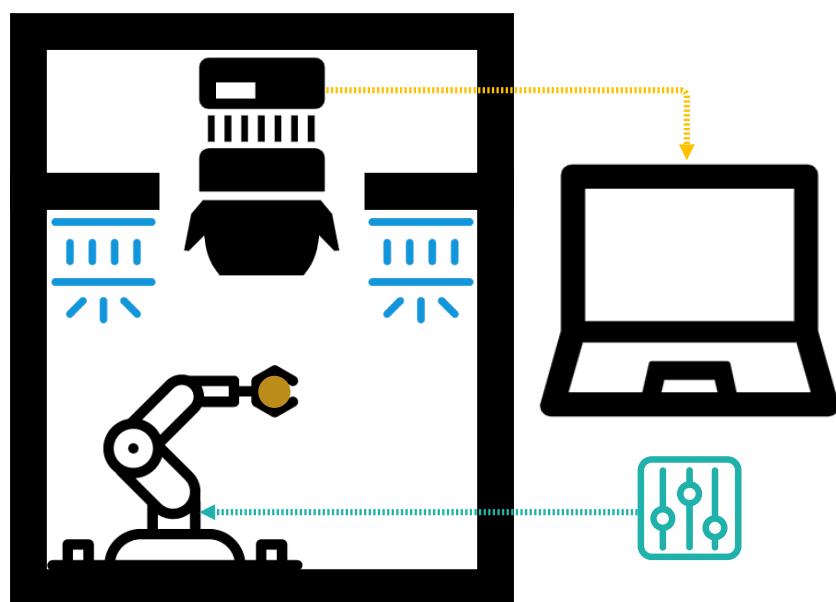
3.1 系统硬件设计

3.1.1 系统总体结构

如图 3-1 所示，为设计的山核桃图像采集系统的控制原理图和示意图，包括遮光板、机架、相机架、相机、机械爪、机械爪控制系统、上位机。



(a) 图像采集系统原理图



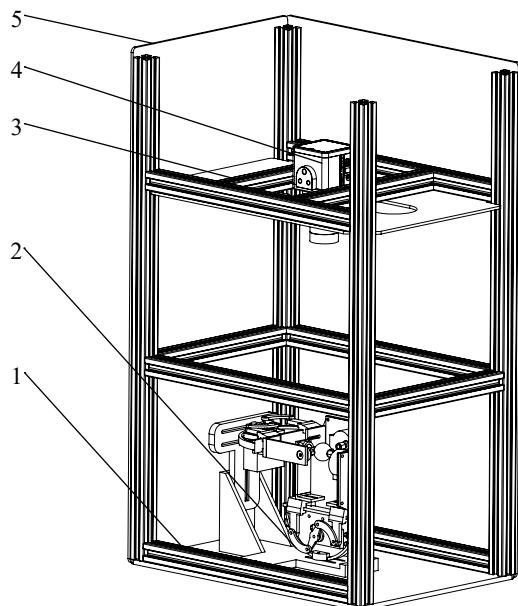
(b) 图像采集系统示意图

图 3-1 图像采集系统总体图

Fig. 3-1 Schematics and diagrams of image acquisition system

3.1.2 外框架

如图 3-2 所示，为图像采集系统的外框架。



(1、外框架；2、机械爪；3、相机架；4、相机；5、遮光板)

图 3-2 图像采集系统外框架

Fig. 3-2 Image acquisition system outer frame

如图 3-3 所示，遮光板安装在外框架外围，相机与外框架相连，相机架与相机相连，连接位置可松动，可根据图像采集需求，改变相机架与外框架的相对位置，从而手动调整相机高度。灯带围绕相机粘贴在相机架下底面，从而可以提供充足的箱内照明，也可以避免一定程度的环境光干扰。直线运动副机械爪放置于底部，相机位于直线运动副机械爪加持核桃位置的正上方。

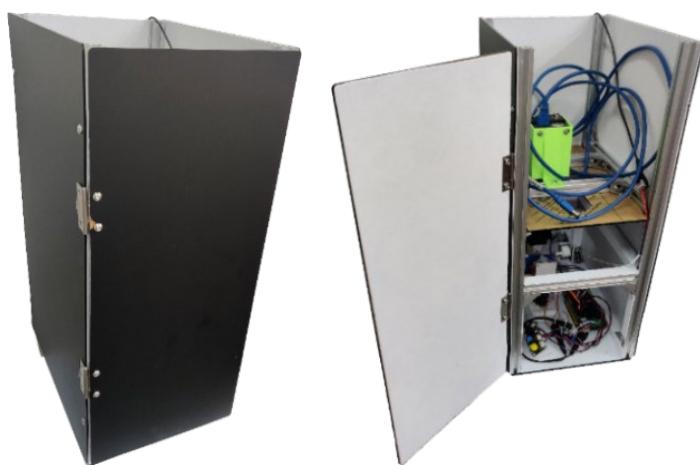
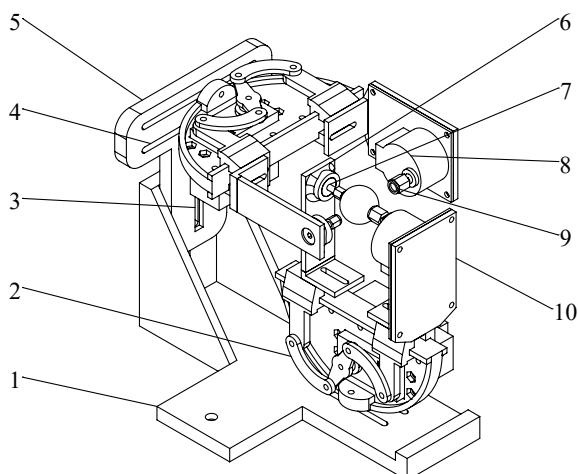


图 3-3 图像采集系统

Fig. 3-3 Image acquisition system

3.1.3 四自由度机械框爪



(1、下底座；2、直线运动副机械爪；3、上底座位置调节槽；4、机械臂位置调节槽；5、上底座；6、轴承架；7、凸轮螺栓轴承；8、步进电机；9、亚克力胶；10、步进电机架)

图 3-4 图像采集系统机械爪

Fig. 3-4 Image acquisition system mechanical claw

如图 3-4 所示，下底座与底面相连，上底座与下底座，通过上底座位置调节槽相连；机械爪与上底座和下底座通过机械爪位置调节槽相连；安装两个直线运动副机械爪相对位置时，通过调节上底座位置调节槽和机械爪位置调节槽，可实现对核桃夹紧位置的对准。轴承架与直线运动副机械爪相连，轴承安装在轴承架上，步进电机架与直线运动副机械爪相连，步进电机与步进电机架相连，亚克力胶与步进电机输出轴相连；每个机械爪的步进电机输出轴与轴承轴线同轴对齐，两步进电机轴线空间垂直相交。机械爪的两个夹持末端与山核桃之间通过透明亚克力胶连接，其中用来夹持纵轴的末端粘贴单面亚克力胶，夹持时通过摩擦力和夹紧力保证山核桃不会掉落，同时可实现切换至横轴夹持时不粘连；用来夹持横轴的末端粘贴双面亚克力胶，夹持时通过粘贴保证山核桃不会掉落。

3.1.4 摄像系统

摄像系统可以直接对核桃的裂纹图片进行采集，从而可以准确记录裂纹的形貌和分布情况，因此对于摄像系统的选择非常重要。

表 3-1 所示为本研究所设计图像采集系统采用的摄像头参数参数，对其参数指标进行分析，摄像头具有合适的焦距、光圈范围等参数，可以满足本实验对图像采集的需求。

表 3-1 摄像头参数

Tab. 3-1 Camera parameters

品牌	富士摄像头
焦距[mm]	25
光圈范围(F. no)	F1.8-F16
视角	32.9°×24.8°
聚焦范围*6 (mm)	∞-100
聚焦操作	手动
光圈操作	手动
滤镜直径[mm]	M37.5 x 0.5
卡口	C-卡口
重量 (g)	170
传感器尺寸 (标准) *7	1.1" (2.5μm)
传感器尺寸 (最大) *8	4/3" (3.45μm)
CRA (主光线入射角) (°)	2.7
畸变率[%]	-0.83
直径 (mm)	φ39×67.3

表 3-2 相机参数

Tab. 3-2 Camera Parameters

品牌	大恒图像
规格	MARS-1230-23U3C
分辨率	4096 × 3000
传感器类型	Sony IMX304 LQR, Global shutter CMOS
光学尺寸	1.1inch
像素尺寸	3.45 μ m × 3.45 μ m
帧率	23.4fps @ 4096 × 3000
模数转换精度	12bit
像素深度	8bit、12bit
快门时间	28 μ s ~ 1s
增益	0dB ~ 24dB
图像数据格式	Bayer RG8/ Bayer RG12
信噪比	40.59dB
同步方式	外触发、软触发
工作温度	0°C ~ 45°C

续表 3-2 相机参数

Tab. 3-2 Camera Parameters

品牌	大恒图像
储存温度	-20°C~70°C
工作湿度	10%~80%
额定功率	<4W@5V
镜头接口	C
机械尺寸	62mmx62mmx50.4mm

如表 3-2 所示，为图片信息采集平台所使用的相机的参数，该相机具有较高的分辨率，可是确保核桃裂纹数据的质量。

3.1.5 系统运行方式

机械爪的运动控制板选用 Arduino MEGA2560。运行时，首先相机开始拍摄视频。固定于底座的直线运动副机械爪夹，加持山核桃长轴，步进电机旋转 360 度后停止，与上底座相连的直线运动副机械爪加持山核桃短轴，之后加持山核桃长轴的机械爪松开，加持山核桃短轴的步进电机，旋转 360 度后停止，然后加持山核桃短轴的机械爪松开。机械爪停止运动，相机结束拍摄，单次运行结束。

3.2 深度学习裂纹目标检测

缺陷检测是各行各业的一项重要任务，如制造业、质量控制和医疗保健。计算机视觉模型被用来实现缺陷检测的自动化，YOLOv8、SSD 和 Faster R-CNN 是三种流行的物体检测模型，已被用于缺陷检测。

本实验的目标是实现对核桃表面裂纹的识别和分类，以期用于后续实验中对裂纹扩展过程中的实时监测，以及用于工业中缺陷核桃的筛选。本章经过训练和验证后，结果是 YOLOv8 性能更优。

3.2.1 目标检测工具库

MMDetection 是一个基于 PyTorch 框架的开源目标检测工具箱，它提供了丰富的目标检测算法^[83]，包括 Faster R-CNN、Mask R-CNN、RetinaNet、FCOS、SSD 等，并且支持多种 Backbone，如 ResNet、ResNeXt、MobileNet 等，同时也支持各种数据增强方法和各种 loss 函数的组合。MMDetection 提供了完整的训练、测试、推理等流程，可以方便地进行模型训练和评估，同时提供了各种可视化工具，便于对模型的表现进行分析和调试。它不仅提供了预训练模型，也支持用户自己的数据集的训练和测试，方便用户在自己的数据集上进行目标检测任务。MMDetection 是目前最

流行和广泛使用的目标检测工具之一，具有很高的可扩展性和灵活性，可以满足各种目标检测任务的需求。

Ultralytics YOLOv8 由 Ultralytics 开发，是一种尖端的、最先进的(SOTA)模型，它建立在先前 YOLO 版本的成功基础上，并引入了新功能和改进，以进一步提高性能和灵活性。YOLOv8 的设计快速，准确，易于使用，使其成为广泛的物体检测，图像分割和图像分类任务的绝佳选择。

3.2.2 算法介绍

(1) SSD 算法

SSD (Single Shot MultiBox Detector) 算法是一种基于深度学习的目标检测算法^[84, 85]。它在输入图像上进行卷积运算，通过多层特征图来预测目标的位置和类别，如图 3-5 所示，为 SSD 模型结构。相较于其他目标检测算法，SSD 速度较快，适用于实时目标检测场景^[86]。

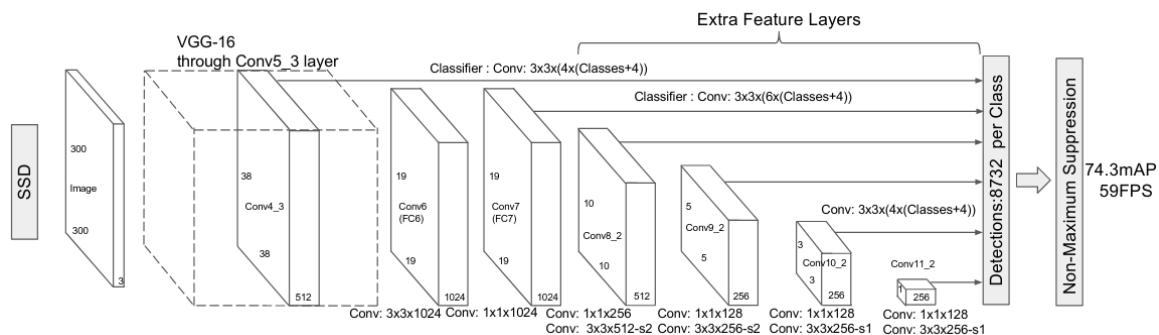


图 3-5 SSD 模型结构

Fig. 3-5 SSD model structure

单阶段目标检测器，使用的是 SSD (Single Shot MultiBox Detector) 算法。该模型结构如下：

backbone: 使用了 VGG16 作为骨干网络，输入图像大小为 300x300，使用预训练权重，从第三个和第四个卷积层输出 feature map，输出分别是 38x38 和 19x19；

neck: 使用 SSDNeck，将骨干网络的输出连接起来，并输出不同的 feature map，共计六层，大小分别是 38x38、19x19、10x10、5x5、3x3、1x1；

bbox_head: 使用 SSDHead，从 feature map 中预测出 bounding box 的位置和类别，其中输入的 feature map 来自 neck 的输出，输出的类别数为 3；

anchor_generator: 使用 SSD Anchor Generator，生成不同 feature map 上的 anchor；

bbox_coder: 使用 Delta XYWHBox Coder 进行 bounding box 的编码；

train_cfg: 训练配置，包括损失函数、正负样本匹配、损失权重等；

test_cfg: 测试配置，包括 NMS、最小 bbox 大小、置信度等。

这个模型的结构比较典型，其中 backbone 使用了 VGG16，neck 和 bbox_head 用于生成 bounding box 的位置和类别，anchor_generator 生成不同大小的 anchor，bbox_coder 对 anchor 进行编码，train_cfg 和 test_cfg 分别用于训练和测试。

(2) Fast R-CNN 算法

Fast R-CNN (Fast Region-based Convolutional Neural Network) 算法是基于深度学习的目标检测算法，它是对 R-CNN 算法的改进，通过共享卷积特征图，从而实现对图像中多个目标的快速检测和分类^[87,88]。相较于 R-CNN，Fast R-CNN 具有更快的检测速度和更好的检测精度。

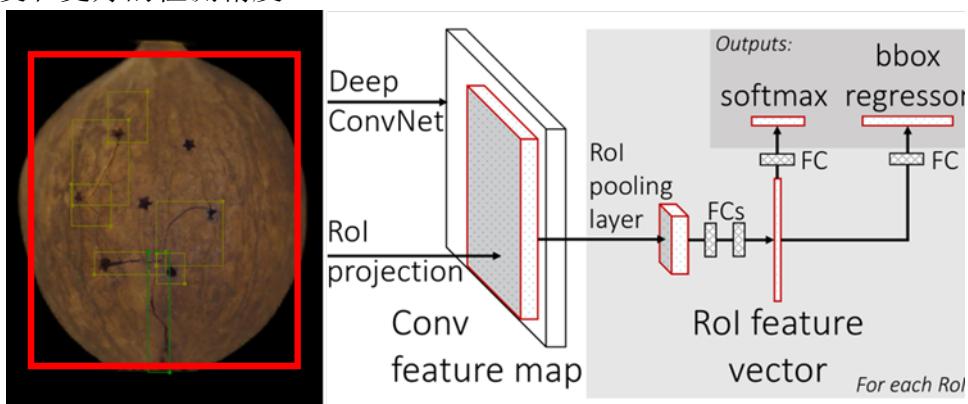


图 3-6 Faster R-CNN 模型结构

Fig. 3-6 Faster R-CNN model structure

如图 3-6 所示，此 Faster R-CNN 模型由主干网(ResNet50)、区域提议网络(RPN)和感兴趣区域(RoI)头组成。通过 ImageNet 上预先训练的权重来初始化主干。RPN 生成对象建议，RoI 头对对象边界框进行分类和回归。

该模型结构如下：

- ① 加载图像及其注释(边界框和标签)。
- ② 调整图像的大小，使其短边为 1333 像素，长边不大于 800 像素，同时保持纵横比。
- ③ 随机将图像水平翻转，概率为 0.5。
- ④ 用均值[103.53,116.28,123.675]和标准差[1.0,1.0,1.0]归一化图像。
- ⑤ 将图像填充为 32 的倍数。
- ⑥ 将图像、真实边界框和标签格式化到字典中。
- ⑦ 收集格式化的数据并返回。

使用以下测试管道评估模型：

- ① 加载图像。
- ② 将图像缩放到多个大小(800、1000 和 1200)，并取它们的最大输出。
- ③ 用均值[103.53,116.28,123.675]和标准差[1.0,1.0,1.0]归一化图像。
- ④ 将图像填充为 32 的倍数。
- ⑤ 将图像格式化到字典中。
- ⑥ 将图像输入模型，得到目标检测结果。
- ⑦ 对结果进行非最大抑制以获得最终检测。

该模型的结构包括一个有 3 个阶段的 ResNet-50 主干，一个带有锚点发生器和边界盒编码器的 RPN 头，以及一个带有共享 ResNet-50 层和边界盒头的 RoI 头。输入的图像被调整到最大尺寸为 1333x800 像素，并且图像在训练中被随机翻转。该模型用交叉熵损失进行分类训练，用 L1 损失进行边界盒回归训练。

在训练过程中，RPN 根据锚箱与地面真实箱的交集（IoU）为其分配正负标签。RoI 头从 RPN 生成的特征图中抽取 RoI，并根据它们与地面真实箱的 IoU 分配正负标签。该模型使用随机梯度下降法（SGD）训练，学习率为 0.02，动量为 0.9，权重衰减为 0.0001。在 8 和 11 个历时中，学习率降低了 10 倍。该模型使用非最大抑制（NMS）进行评估，IoU 阈值为 0.5。

（3）YOLO v8 算法

YOLO v8 算法是基于深度学习的目标检测算法，YOLO 是 You Only Look Once 的缩写，意为“你只需看一次”。相较于传统的目标检测算法，YOLO 采用全卷积神经网络实现目标检测，实现了端到端的训练和实时检测。YOLO v8 是基于 YOLOv5 算法的改进版，它是一个端到端的目标检测模型，可以实现高效、准确的物体检测和分类。下面是 YOLOv8 的模型结构详细介绍：

Backbone 网络：YOLOv8 使用 CSPDarkNet53 作为骨干网络，它是 YOLOv5 中的改进版本，主要由一个卷积层和一个残差块组成。这个块的设计采用了“分离-整合”的策略，使得网络具有更好的计算和内存效率。

Neck 网络：YOLOv8 中使用了 SPP 结构，即空间金字塔池化，以便更好地处理不同大小的物体。SPP 结构通过在不同尺度上应用不同大小的池化核来捕获图像的空间信息。

Head 网络：YOLOv8 的检测头包括一个卷积层和一个多层次感知器（MLP）层。卷积层用于提取特征图中的物体边界框，MLP 层用于对边界框进行分类和定位。

损失函数：YOLOv8 使用了一种基于交叉熵的综合损失函数，用于同时训练分类和回归任务。该损失函数同时考虑了分类误差和边界框误差。

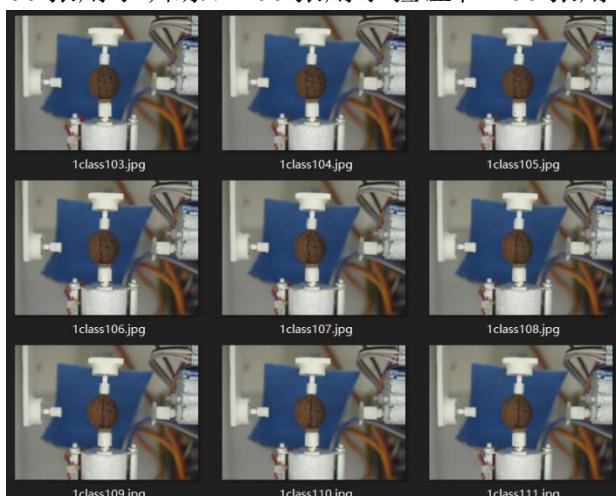
总的来说，YOLOv8 的模型结构和 YOLOv5 相似，但在训练策略、数据增强和模型参数等方面进行了调整和优化，从而进一步提升了检测性能。

为解决裂纹方向和随机的问题，基于前述人工短口钳开壳方法，在课题组现有研究基础上，对于核桃干燥过程中裂纹与干燥特性间关系进行研究，结合实验与深度学习、BP 神经网络，对于最佳的干燥特性参数进行探究，为坚果破壳设备的研发提供可靠理论依据。

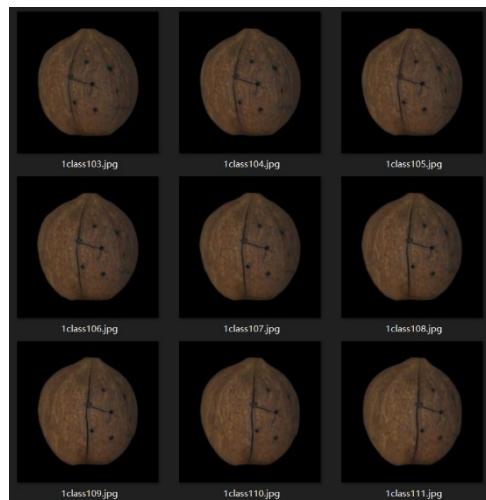
3.2.3 制作数据集

(1) 数据采集

使用 3.2 所述图像采集系统，机械爪子先夹取核桃纵轴，旋转 360 度，然后夹取核桃横轴，松开核桃纵轴，旋转 360 度，相机全程俯拍视频，后抽取视频的每一帧作为图片。为避免杂乱背景对图像识别效果的干扰，以确保数据集分布相同，使用 Photoshop 软件批处理功能，提取图片中核桃的像素区域，将背景替换为黑色，并调整图片大小为 1000*1000dpi（图 3-7）。本数据集拍摄 220 个核桃，共制作数据集图片 2241 张，其中 1200 张用于训练、400 张用于验证和 400 张用于测试。



(a) 批处理前



(b) 批处理后

图 3-7 山核桃数据集图片批处理效果

Fig. 3-7 Hickory dataset image batching effect

(2) 图像标注

如图 3-8 所示, 为数据集中一枚山核桃的裂纹目标检测标注示意图, 使用 labelme 对不同种类的裂纹进行标注。由于本研究主要探究五角星冲孔和六角星冲孔处萌生新裂纹数量的差异, 故将裂纹分为三个类别, 分别是: 联通五角星的裂纹(pentagram)、联通六角星的裂纹(hexagram)、未与冲孔直接连通的裂纹(crack), 裂纹以分叉节点为结束标志, 每当裂纹延伸至分叉节点, 则视为此裂纹截止, 节点处其他裂纹视为新裂纹纳入计数。

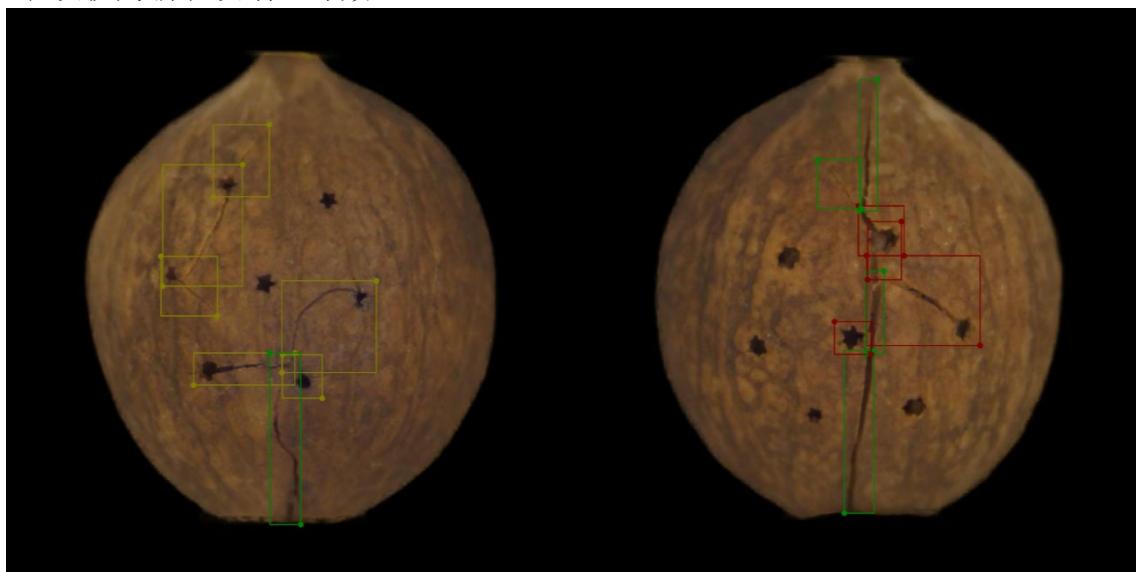


图 3-8 裂纹目标检测标注示意图

Fig. 3-8 Crack target detection labeling diagram

3.2.4 训练算法

本章节使用 mmdetection 作为目标检测工具，采用 SSD 算法、Faster R-CNN 算法和 YOLO v8 算法进行数据分析。

3.2.5 算法评估指标

本研究将采用以下指标对算法进行评估：

准确率（Accuracy）：检测结果正确的样本数与总样本数的比值。

召回率（Recall）：被正确检测为裂纹的样本数与总裂纹样本数的比值。

F1 值（F1 score）：准确率和召回率的调和平均值。

平均精度均值（Mean Average Precision, mAP）：在不同 IoU 阈值下的平均精度，用于评估算法的目标检测性能。

模型推理速度：模型在单张图像上进行推理所需的平均时间，用于评估算法的实时性能。

3.3 结果与讨论

3.3.1 最优算法对比及结果

表 3-3 三种算法在测试集上的检测精度和推理速度

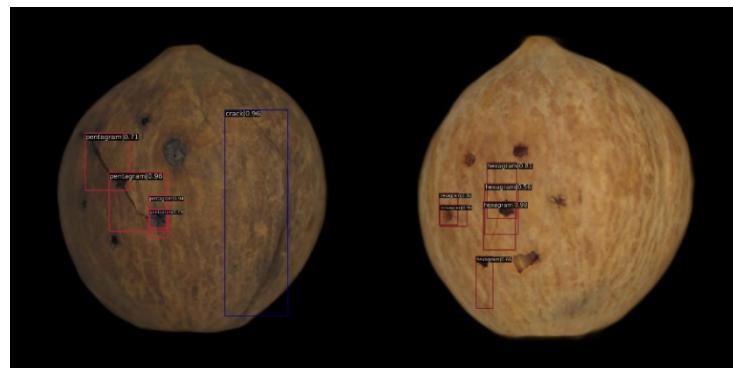
Tab. 3-3 Detection accuracy and inference speed of the three algorithms on the test set

算法	准确率	召回率	F1 值	全类平均精度	推理速度
SSD	0.872	0.783	0.825	0.830	45ms
Faster R-CNN	0.899	0.825	0.860	0.849	90ms
YOLOv8	0.9	0.929	0.898	0.934	1.7ms

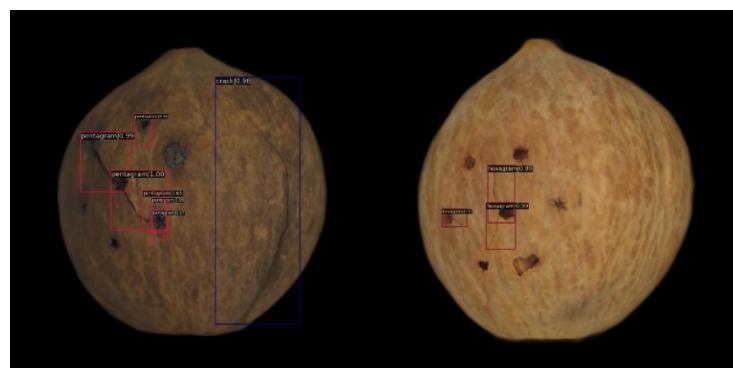
从表 3-3 中可以看出，YOLOv8 算法在准确率、召回率、F1 值和 mAP 等指标上均表现最好，而且推理速度也最快。相比之下，SSD 算法虽然推理速度快，但准确率和 mAP 等指标均低于 YOLOv8 算法；Faster R-CNN 算法虽然检测精度较高，但推理速度慢于 SSD 和 YOLOv8 算法。

3.3.2 算法性能比较

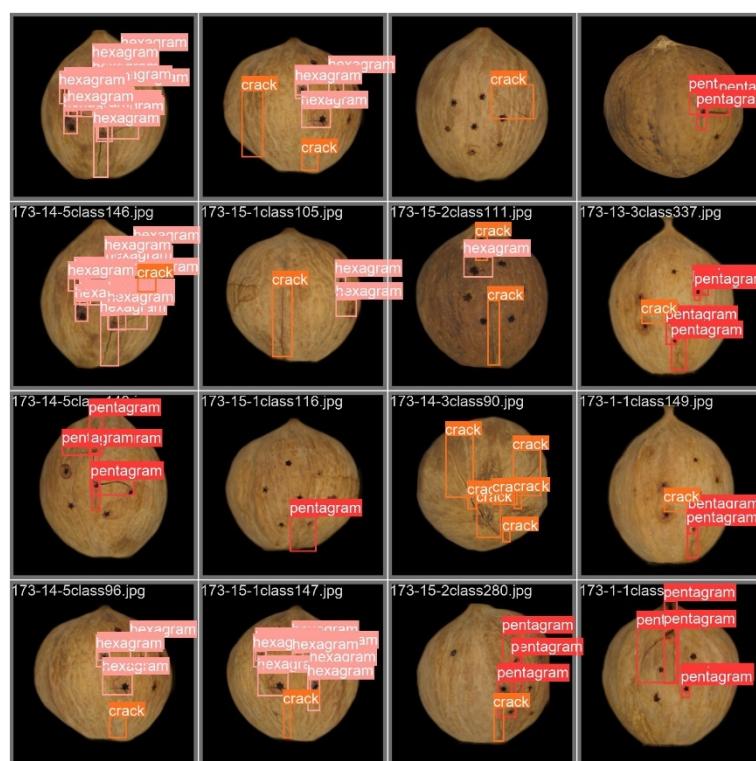
如图 3-9 所示，展示了三种算法在测试集上的目标检测结果示例。从图中可以看出，YOLOv8 算法能够检测到更多的裂纹，且检测结果更准确。



(a) SSD 识别效果



(b) Faster R-CNN 识别效果



(c) YOLO v8 识别效果图

图 3-9 不同算法裂纹识别效果图

Fig. 3-9 Different algorithm crack identification effect

综上所述，本研究在山核桃裂纹检测任务中，YOLOv8 算法表现最优，可作为山核桃裂纹检测的一种有效方法。

3.4 本章小结

本章搭建了图像采集系统，该部分可对大量干燥后的山核桃图像数据进行采集，共制作数据集图片 2241 张，其中 1200 张用于训练、400 张用于验证和 400 张用于测试，使用 mmdetection 作为目标检测工具，采用 SSD 算法、Faster R-CNN 算法和 YOLO v8 算法进行数据分析，得出以下结论：

(1) 以准确率 (Accuracy)、召回率 (Recall)、F1 值 (F1 score)、平均精度均值 (Mean Average Precision, mAP) 和模型推理速度几个指标对几种算法进行评估，对比发现 YOLOv8 算法在准确率、召回率、F1 值和 mAP 等指标上均表现最好，而且推理速度也最快；

(2) 利用 SSD 算法、Faster R-CNN 算法和 YOLOv8 算法三种算法在测试集上对目标检测结果进行对比，结果发现 YOLOv8 算法能够检测到更多的裂纹，且检测结果更准确；

第四章 冲孔形状和干燥方式优化

山核桃课题组所研制的仿生敲击式山核桃破壳机，所采取的破壳形式为窝眼锤头冲击式，其加工效果尚可满足目前宁国山核桃加工工艺要求，但分析一次破壳后的果仁损伤率可知，仿生敲击式山核桃破壳机在进行破壳加工处理时，仍能对果仁造成一定的损伤。后有学者提出的 O、X 和 Y 型等冲点式预制裂纹处理方式中，可产生一定的裂纹数量，从而有利于破壳^[13]。基于此结果，本研究对比探究十字型、五角星型和六角星型冲孔以及烘干、热风、红外、红外热风（简称红风）、真空加热法干燥对山核桃裂纹的影响，以期找到最适合预制裂纹的加工条件。

4.1 材料与设备

4.1.1 实验材料

山核桃样本为安徽省宁国市当地所产的山核桃。采收去青皮后剔除病虫害、畸形核桃，同时为减少初始含水率、质量比的变化，所有核桃均经过圆孔筛筛选后，直径 $d \in (19,20)$ 的形态正常的样本。其平均含水率和组分质量比无显著差异，进而假设其相同。将核桃样品放入密封袋内保存。

4.1.2 实验设备

水槽、五角星型及六角星型电动螺丝刀批头（规格 $4 \times 28\text{mm}$, S2 钢）、3D 打印手动冲孔台、电热恒温干燥箱（型号 101-0R, $25\text{m}^3, 0.5\text{kW}$, 浙江力辰仪器科技有限公司）、红外高温干燥箱（型号 DHG500-0, $25\text{m}^3, 2\text{kW}$, 上海喆钛机械制造有限公司）、电热真空干燥箱（型号 DZF-6020A, $300*300*275$, 300W）。

4.2 实验方法

4.2.1 浸泡干燥实验

(1) 预制裂纹

以缝合线为分界线，将山核桃划分为正反两面，沿用课题组之前的冲孔分布数据，一面等距 5mm 做 7 个五角星型冲孔，另一面等距 5mm 做 7 个六角星型冲孔，如图 4-1 所示。

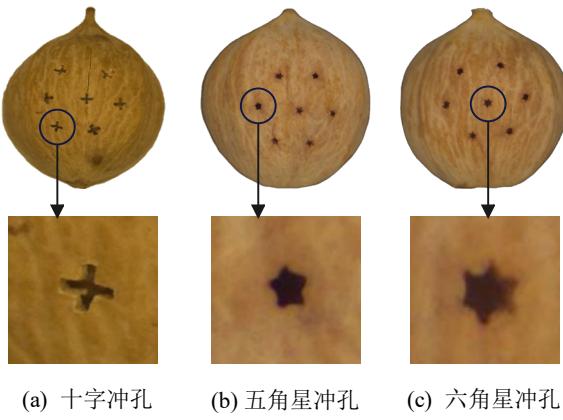


图 4-1 冲孔形状

Fig. 4-1 Punch shape

(2) 浸泡实验

核桃样本数量大于等于 3 个时可实际反映裂纹扩展情况，且根据山核桃加工工艺，为防止在烘烤过程中，果仁水分过分流失影响其品质，故对预制裂纹处理后的样本进行浸泡处理，直至含水率不再变化。

(3) 干燥实验

实验使用的干燥方式为 5 种，包括：烘干、热风、红外、红外热风（简称红风）、真空加热法。在热风开启和热风关闭两种不同状态下，分别进行实验。实验所使用的干燥箱均提前加热到 175℃，保持一段时间至温度恒定。取出经浸泡处理后的核桃，擦干至不滴水状态，统计新增裂纹变化后，迅速将 3 个核桃放入不同干燥箱，干燥 2min 后断电，冷却至室温后取出，统计新增裂纹情况。

(4) 裂纹评价

使用孔间裂纹联通数、分叉节点数、可分区、分离区、短裂纹数 ($<10\text{mm}$)、长裂纹数 ($>10\text{mm}$) 六个数量指标来评价裂纹情况。如图 4-2 所示，多个破壳裂纹所形成的封闭区域中，壳能够直接脱落的区域被称为分离区，而壳未能脱落的区域则称为未分区。特别的，如果未分区在处理后壳能够脱落，则称为可分区；如果壳无法脱落，或者壳和仁分离后对仁造成了损伤，则称为难分区。

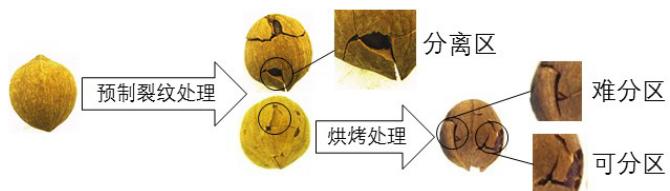


图 4-2 破壳裂纹区域划分

Fig. 4-2 Crack area division in cracked shell

4.2.2 力学实验

如图 4-3 所示，使用微机控制电子万能实验机对冲孔时的力进行测量记录。



图 4-3 冲孔力测量实验现场图

Fig. 4-3 Field diagram of punching force measurement experiment

4.3 结果与讨论

4.3.1 冲孔形状对裂纹产生的影响

如图 4-4 所示，经统计，山核桃浸泡处理后无新增裂纹；经干燥处理后，每组核桃均以冲孔边缘为起点，产生了新裂纹。



图 4-4 不同冲孔形状和干燥状态下山核桃裂纹表现

Fig. 4-4 Hickory cracking performance under different punching shapes and drying states

如图 4-5 所示, 可分区和分离区新增裂纹总数均小于 10 条; 孔间裂纹联通数、分叉节点数、短裂纹数均遵循规律: 六角星>五角星>十字冲孔, 短裂纹数相较其他指标数值最大, 六角星形成的短裂纹总数高达 135 条; 长裂纹数则呈现五角星多于六角星的规律。

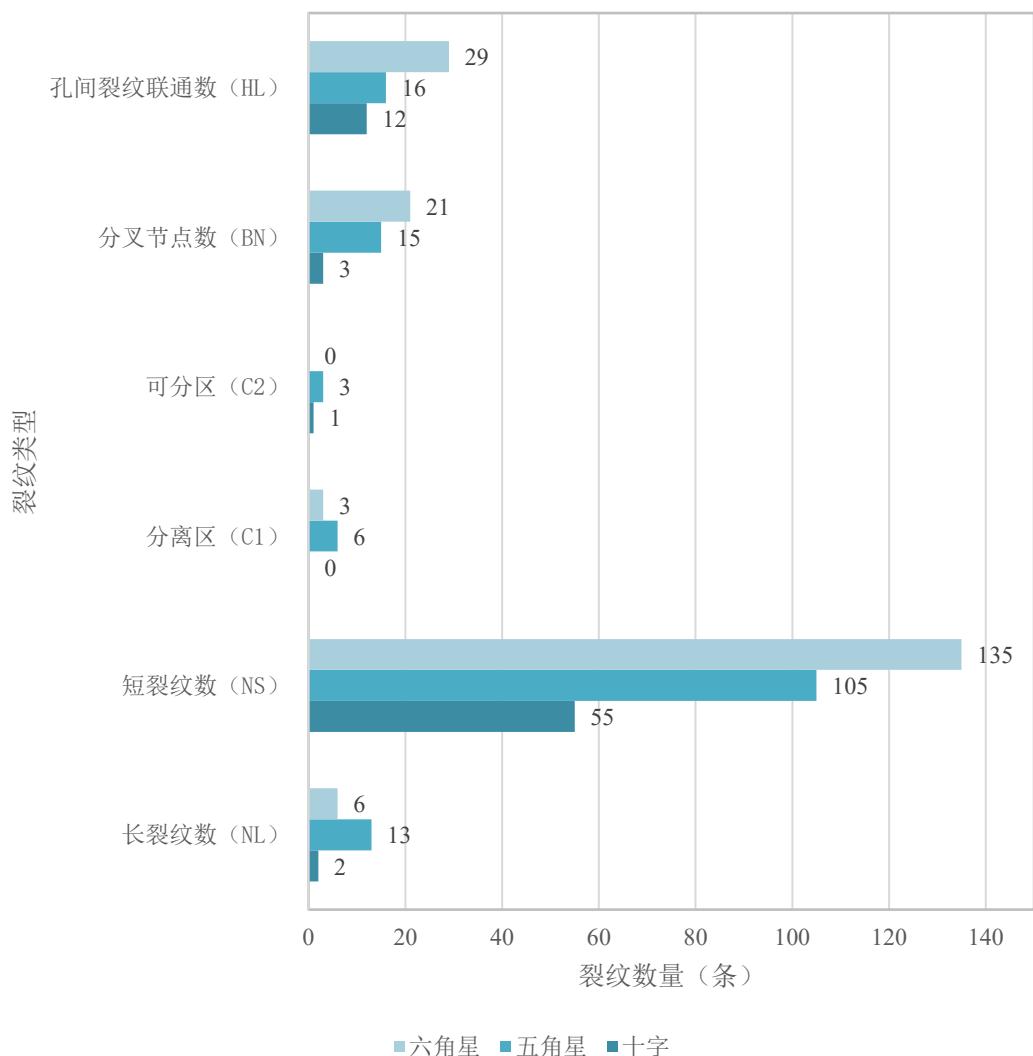


图 4-5 预制裂纹指标

Fig. 4-5 Prefabricated cracking method indicators

4.3.2 干燥方式对裂纹产生的影响

如图 4-6 所示, 可分区和分离区以及长裂纹数新增裂纹数均小于 10 条, 故不考虑此三项指标对裂纹数产生的影响; 分叉节点数只有热风干燥法和烘干法数量大于 10 条, 可见普通加热方式更易使裂纹产生分叉。短裂纹数数量最多, 且短裂纹是后期振动破壳工序中裂纹扩展的基础, 故此指标最具有指导意义, 产生短裂纹数最多的干燥方式依次为红外热风法、烘干法、真空法。

孔间裂纹联通数反映了各个孔之间的裂纹相关性，此数值代表了一定程度上可人工控制的裂纹，裂纹的联通是形成可分区和分离区的必然过程；本次实验中，孔间裂纹联通数产生最多的干燥方式从高到低依次为烘干法、红外加热法、红外热风法。短裂纹数和孔间裂纹联通数中，排名前三的数据里，烘干法和红外热风法均出现两次，涉及到红外加热方式的指标出现三次，可见红外加热对于裂纹产生的影响值得研究。且已有研究证明，传统烘干法不利于干燥物料的干燥均匀性和导湿性，必须加以热风才有助于物料的干燥^[36]。

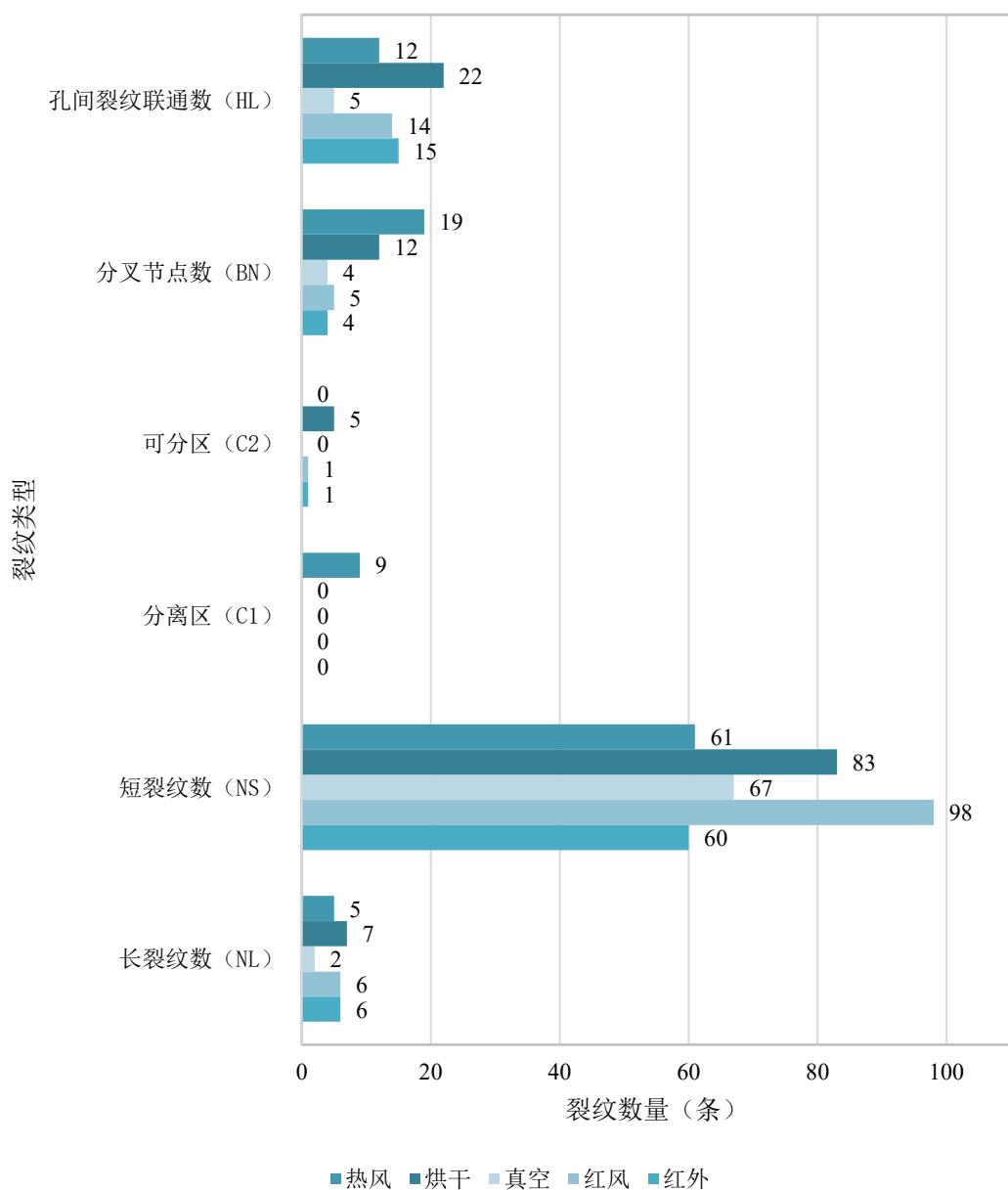


图 4-6 干燥方式指标

Fig. 4-6 Drying method indicators

4.3.3 冲孔力测量结果

如图 4-7 所示, 经由电子万能实验机测试, 测得使用手动冲压台冲孔的条件下所需单个冲孔破壳临界力范围为 90-130N 不等, 破壳形变范围为 1-1.5mm 不等。

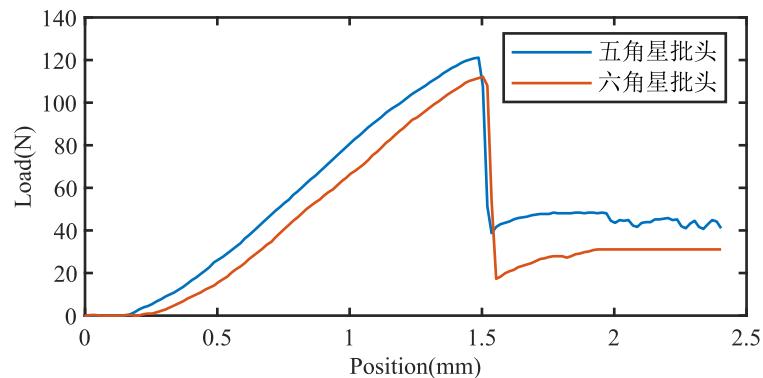


图 4-7 五角星和六角星批头冲孔力

Fig. 4-7 pentagram and hexagram bits punch force

4.4 本章小结

本章通过对核桃进行力学实验和干燥实验得出以下结论:

- (1) 使用手动冲孔台的条件下, 单个冲孔所需力的范围是 100 N-130 N;
- (2) 五角星和六角星两种冲孔形状进行预制裂纹处理能获得更多符合预期的预制裂纹数目;
- (3) 红外热风干燥法可获得的裂纹数目最多。

基于以上结论, 选取五角星型和六角星型, 红外热风加热干燥方式, 进行后续对比实验。

第五章 山核桃近红外热风干燥特性研究

水分输送过程的知识对于食品干燥过程的理解和准确建模非常重要^[89, 90]。有效水分扩散系数是表征干燥过程中固有水分传递机制的重要参数之一^[91]。Fick 方程可以明确地将水分扩散率与干燥速率联系起来，特别是在下降速率干燥阶段^[92]。然而，生物或食品材料的水分扩散率通常受到含水率和温度的显著影响。因此，平均水分扩散率通常不能提供足够的信息来反映食品干燥过程中水分的动态扩散特性。然而，具有恒定水分扩散率的干燥动力学建模有时可能导致与真实食品干燥特性的偏差，特别是在低含水率范围^[93]。因此，本章节同时测定红外热风干燥过程中核桃壳和核桃仁的有效水分扩散系数，以裂纹数量为研究对象，探究加热方式、干燥时长、冲孔形状等影响因素对核桃干燥过程裂纹数量的影响。

5.1 材料与设备

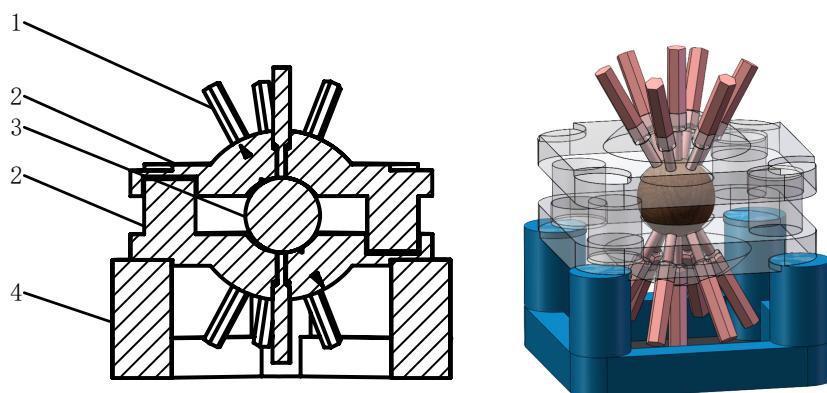
5.1.1 实验材料

本次研究的山核桃样本来自于宁国市本地所产的山核桃，脱脯后的山核桃经过漂洗去掉坏籽，后自然晾晒，密封常温保存。

5.1.2 实验设备

(1) 样品制备阶段：

网孔筛（不锈钢，高度直径 30cm，孔径 20mm）、批头（五角星）五角星型及六角星型电动螺丝刀批头（规格 4×28mm，S2 钢）、3D 打印手动冲孔台（图 5-1）、水槽。



(1、批头；2、穹顶冲压台；3、核桃；4、底座)

图 5-1 山核桃手动冲孔台剖面图和三维图

Fig. 5-1 Profile and physical picture of Hickory manual punching

(2) 样品干燥阶段:

悬吊式核桃干燥实时信号采集系统、红外高温干燥箱（型号 DHG500-0， $25\text{m}^3 \times 3.2\text{kW}$ ，上海喆钛机械制造有限公司）、耐高温手套、夹子、称量瓶（高型 25×40 ，瓶重 11g ）、有机玻璃烧杯架（ 10ml , 12孔，孔径 27mm ）。

(3) 样品处理阶段:

图像采集平台、相机（大恒 MARS-1230-23U3C）、摄像头（富士 CF25ZA-1S）、电子天平（ 0.001g ）、玻璃培养皿（直径 60mm ）、尖嘴斜口钳、镊子、近红外光谱仪。

5.2 实验方法

5.2.1 实验流程

如图 5-2 所示为实验流程图，基于第二章的实验，该实验选择的预制裂纹处理方式是为一侧五角星冲孔和一侧六角星冲孔，干燥方式为近红外热风干燥。

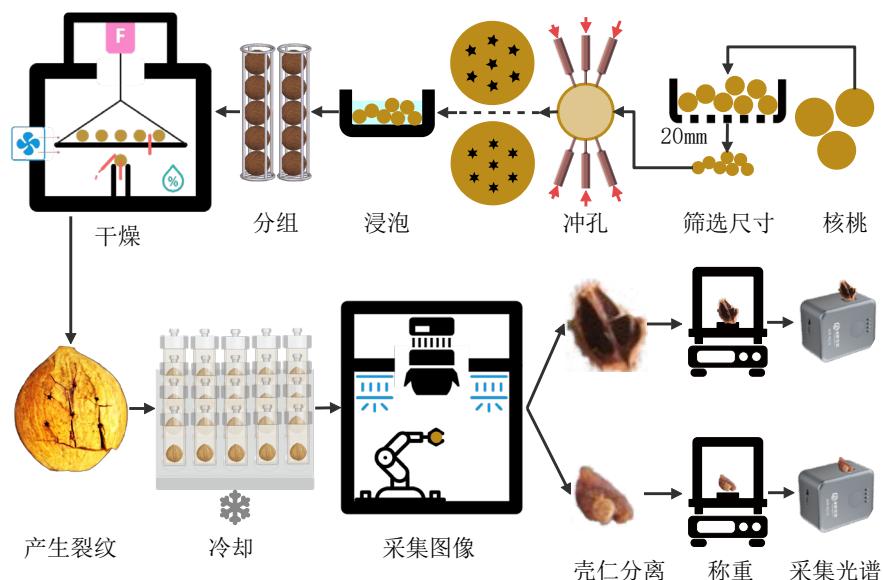


图 5-2 实验流程示意图

Fig. 5-2 Experimental flow diagram

实验具体流程如下：

第一步，对核桃尺寸进行筛选，选择直径为 20 mm 的核桃进行实验，以保证实验的重复性和一致性；

第二步，对核桃表面进行预制裂纹处理，核桃一侧冲孔形状为五角星，一侧冲孔形状为六角星；

第三步，将处理后核桃浸泡后，装入信息采集平台的金属笼，进行干燥实验以及信息记录；

第四步，对于干燥后核桃冷却处理，并对样品进行裂纹信息收集和含水率检测。表 5-1 为实验因素-水平表，采用 4 因素 10 水平，4 因素分别为冲孔形状、裂纹扩展方式、干燥至指定含水率、预设温度值。基于文献经验值^[94-96]，本实验设计以 43℃ 为基准，53℃ 至 173℃，每 30℃ 为一级进行干燥实验，并全程监测核桃各项数值变化。

表 5-1 因素-水平表
Tab. 5-1 Factor-Level table

序号	冲孔形状	裂纹扩展方式	干燥至指定湿基含水率	温度(℃)
1	五角星 0.8mm	热风	0	43
2	六角星 2mmT2	红外热风	1/10	43
3			2/10	53
4			3/10	83
5			4/10	113
6			5/10	143
7			6/10	173
8			7/10	
9			8/10	
10			9/10	

5.2.2 样品制备

一个核桃的实验数据不能代表整个批次以及当前品种。因此，选择具有相似尺寸的核桃进行干燥实验，以减少初始重量比的变化。筛选直径（19,20）mm 之间的核桃（因为此直径核桃占比最多）。

敲击手动冲压台上方穹顶冲压台批头外部末端，使 7 个批头内部多边形嵌入核桃壳，然后将底座和下方穹顶冲压台分离，改为原上方穹顶冲压台的圆形沉孔与底座四的立柱之间过渡配合连接，此时原下方穹顶冲压台置于上方。

再次敲击上方穹顶冲压台批头外部末端，使 7 个批头内部多边形嵌入核桃壳，置此，核桃上下两面分别为五角星和六角星冲孔，单面冲孔数量为 7 个，冲孔之间距离相等，核桃表面冲孔共 14 个。

5.2.3 干燥实验

干燥箱在干燥实验前开启运行，直到达到指定的干燥条件。开启干燥箱，预热至恒定预设温度。将单层平铺在托盘中的样品核桃迅速放入干燥箱，并将托盘悬挂在拉压传感器的悬吊连接件上，通过称重传感器对样品的重量自动测量并记录重量

变化；如表 5-3 所示，通过在外壳上预先钻孔的小孔将 PT100 热电阻固定在内核，并将其他热电阻连接到外壳表面，以自动连续测量记录样品温度；利用温湿度传感器实时记录湿度。所有数据由自行编写的程序连续监测和记录。

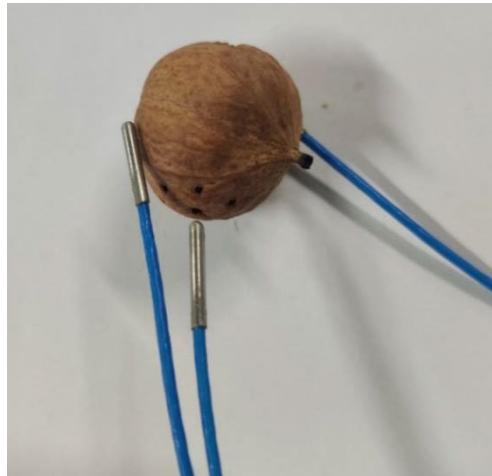


图 5-3 三个热电阻与核桃相对位置示意图

Fig. 5-3 Three thermal resistors are positioned relative to the walnut

含水率每下降 1/10，蜂鸣器报警，提示取出当前时间点样品。迅速用镊子取出一分组笼及其中的 5 枚核桃，每枚按顺序分别放入对应标号的干燥瓶中冷却至室温。

(图 5-4) 对每枚核桃称重并记录。对每枚核桃拍摄全视角视频，并在后期抽取视频帧作为图片数据集。对每枚核桃人工破壳，果壳、果仁分别采集光谱信息。(图 5-5)

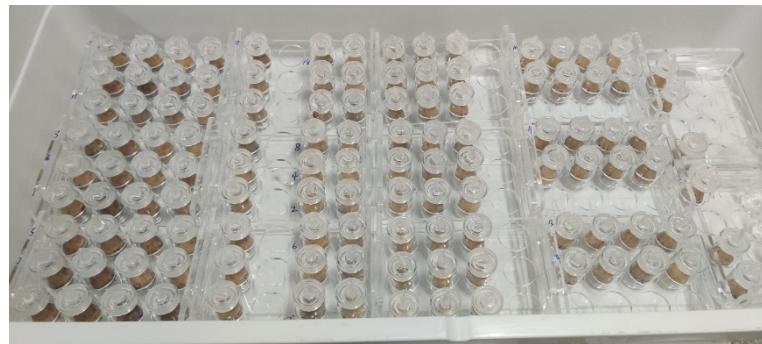


图 5-4 山核桃在干燥瓶中冷却

Fig. 5-4 Pecans cooled in drying jars



图 5-5 壳仁分离检测后标号收纳

Fig. 5-5 The label is stored after separation and detection of shell kernel

5.3 研究方法

5.3.1 数据处理

- (1) 将核桃重量、温度相关的干燥特性实时数据进行拟合和计算，建立山核桃干燥数学模型，总结山核桃干燥规律。
- (2) 使用采集到的含有裂纹的核桃图片，训练深度学习目标检测 YOLOv8 模型，并统计每个采集点裂纹数量。
- (3) 综合山核桃干燥数学模型、温度、冲孔形状以及裂纹数量数据，对比分析，得出裂纹扩展规律，进一步得出最适加热温度和冲孔形状。

5.3.2 信号处理

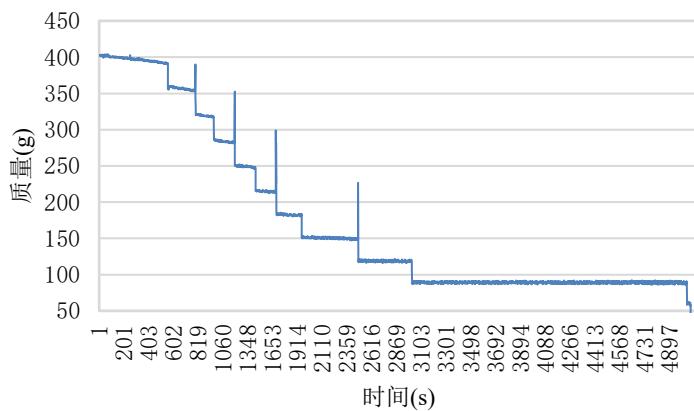


图 5-6 173°C 实测重量记录

Fig. 5-6 record of actual weight at 173°C

如图 5-6 所示，每次取出样本时，拉压传感器检测并记录下来的质量曲线会产生阶梯状变化，此变化的数值为取出样本和金属笼的总体质量。为得到反映山核桃总体平均质量变化的曲线，需对原始数据进行换算处理，得到连续无阶跃的质量变化数据，每次阶跃变化时所需进行的运算公式如下：

设：

u = 减去悬吊件后所剩质量

v = 减去笼重后所剩质量

w = 单个核桃当前重量均值

则： [97]

$$\begin{cases} u = t - e \\ v = u - c * j \\ w = v / (5 * j) \end{cases} \quad (4-1)$$

对每段阶梯变化发生的时间节点之间的数据，使用 Microsoft Office Excel 表格做如上运算，即可得出取样品时间节点时，正在干燥的山核桃总体平均单个质量。

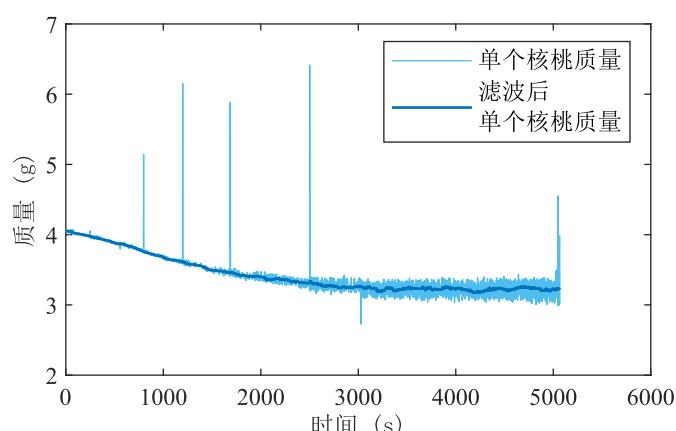


图 5-7 山核桃质量变化曲线滤波效果图

Fig. 5-7 Filtering effect of pecan quality change curve

经换算后得出的单个核桃滤波前后曲线如图 5-7 所示。每次取样本时会有数据扰动，其特征为大幅度短时间的突变，且采集到的信号具有噪声，不利于进一步的拟合等分析，因此对数据进行滤波处理，使用 MATLAB 软件，采用清理离群值的方法对曲线进行优化处理：首先采用移动中位数法定义离群值，不同温度下的曲线噪声表现不尽相同，阈值因子为 0.1-0.3 不等，移动窗口居中，窗口单位为 100-500 不等，使用中心值法填充离群值。

5.3.3 干燥特性参数计算

(1) 含水率

含水率(Moisture Content , MC)分为干基含水率和湿基含水率两种^[98, 99], GB50093—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》中^[100], 对干基含水率的测量有提到, 被干燥物料干燥结束后, 应放入干燥器内冷却, 重复干燥至前后两次质量差不超过2mg, 即为恒重。

核桃干基含水率计算公式为:

$$MC_{tD} = \frac{(W_{kt} - W_{kd}) + (W_{rt} - W_{rd})}{(W_{kd}) + (W_{rd})} \quad (4-2)$$

即

$$MC_{tD} = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (4-3)$$

MC_{tD} ——核桃t时刻的干基含水率(%);

W_{kt} ——果壳t时刻的质量(g);

W_{kd} ——果壳t时刻的干基质量(g);

W_{rt} ——果仁t时刻的质量(g);

W_{rd} ——果仁t时刻的干基质量(g);

W_t ——核桃t时刻的质量(g);

W_d ——核桃t时刻的干基质量(g).

核桃湿基含水率计算公式为:

$$MC_{tW} = \frac{(W_{k0} - W_{kt}) + (W_0 - W_{rt})}{(W_{k0}) + (W_{r0})} \quad (4-4)$$

即

$$MC_{tW} = \frac{W_0 - W_t}{W_t} \quad (4-5)$$

MC_{tW} ——核桃t时刻的湿基含水率(%);

W_{kt} ——果壳t时刻的质量(g);

W_{k0} ——果壳初始时刻的质量(g);

W_{rt} ——果仁t时刻的质量(g);

W_{r0} ——果仁初始时刻的质量(g);

W_0 ——核桃初始时刻的质量(g).

(2) 干燥速率

干燥速率(Drying Rate,DR)是研究干燥动力学的一个重要参数, 能够反映干燥时间、干燥含水率和干燥速率之间的关系。

干燥速率计算公式为:

$$DR = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} \quad (4-6)$$

DR——干燥速率($\% \cdot s^{-1}$);

M_0 ——核桃初始含水率(initial moisture content , IMC) (%);

M_t ——核桃 t 时刻 MC_{tD} (%).

(3) 水分比

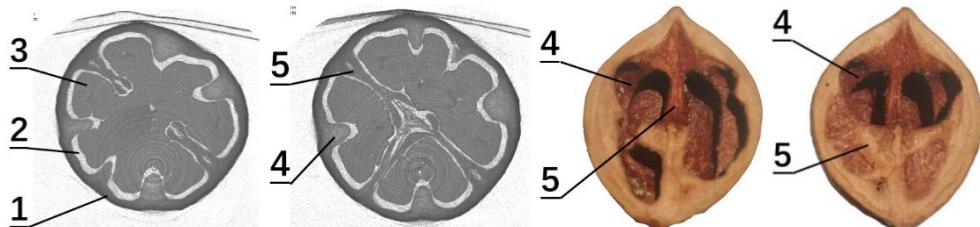
水分比(Moisture Ratio,MR)是用来表示一定条件下物料的剩余水分率，计算公式为：

$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \quad (4-7)$$

M_∞ ——核桃干燥至平衡时的 MC(%).

5.3.4 有效水分扩散系数计算

有效水分扩散系数(D_{eff} , Effective moisture diffusivity)是表示干燥过程当中水分在被干燥物料中扩散情况的重要参数，反映被干燥物料在一定干燥条件下的脱水能力。有效水分扩散系数越大，表示物料内部当中的水分越容易迁移扩散。



(1、壳；2、壳仁间隙；3、果仁；4、小隔木；5、大隔木)

图 5-8 山核桃结构示意图

Fig. 5-8 Schematic diagram of hickory structure

如图 5-8 所示，核桃的几何形状并不规则^[19]，但核桃的球形度及其他几何参数如表 5-2 山核桃几何物理参数所示^[101]。此外，先前的研究将形状不规则的树坚果(核桃、开心果和杏仁)处理为球形，建模结果与干燥数据吻合良好^[81, 102]。因此，在这项研究中，假设核桃壳的几何形状是球形是合理的。

表 5-2 山核桃几何物理参数

Tab. 5-2 Hickory geometric physical parameters

名称	数值
平均直径(mm)	20.6
平均厚度(mm)	2.2
球度系数	0.98
破壳平均力大小(N)	265.7
此时外壳在集中力的方向下位移(mm)	0.77

基于 Fick 扩散方程，假定核桃壳和核桃仁的体积收缩均为球状，可计算核桃壳和核桃仁的有效水分扩散系数(Effective Moisture Diffusivity ($m^2 \cdot s^{-1}$), D_{eff})。先前已有研究实践，为了弥补由于不断扩散和均匀性简化而造成的不准确，提出以下重要假设^[78]：

- (1) 水分在核桃各组分内部分布均匀；
- (2) 水分传递关于核桃中心对称；
- (3) 与材料内部相比，材料表面的传质阻力可忽略不计；
- (4) 有效水分扩散系数仅在两个相邻测点之间的短时间间隔内保持恒定，且在整个干燥过程中是分段连续的。

下式可用于弥补由于恒定的扩散率和均匀性造成的不准确性^[43]：

$$\frac{\partial MC}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{\text{eff}} \frac{\partial MC}{\partial r} \right) \quad (4-8)$$

Crank 指出^[92]，Fick 第二非稳态扩散定律忽略了温度和总压梯度的影响，如果只考虑径向扩散，就可以描述食物脱水过程中发生在下降速率期间的水分运移。对于半径 r 恒定的球形物体，如果在整个干燥过程中，假定扩散系数 D_{eff} 恒定，初始水分分布均匀，表面水分等于平衡含水量，径向对称扩散，则可以解析解决这个问题：

$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} \quad (4-9)$$

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2} \right) \quad (4-10)$$

N——项数， $n=1, 2, 3 \dots n$ ；

t ——干燥时间(s)；

r ——球体的有效半径(mm)；

D_{eff} ——有效水分扩散系数；

当 $n > 1$ 时，随着 t 的增加，无穷级数每项趋近于零。

忽略高阶项($n > 1$)，取=1，方程变为：

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \exp \left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2} \right) \quad (4-11)$$

球体有效半径计算公式为^[103]：

$$r = \frac{\sqrt[3]{L \cdot W \cdot T}}{2} \quad (4-12)$$

L ——核桃轴向尺寸(mm)；

W ——核桃纵向尺寸(mm)；

T ——核桃缝向尺寸(mm)；

将式(9)和式(12)联立，即：

$$MR = \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{r^2}\right) \quad (4-13)$$

进一步简化为方程：

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty}\right) = \ln\left(\frac{6}{\pi^2}\right) - \left(\pi^2 \frac{D_{\text{eff}} t}{r^2}\right) \quad (4-14)$$

则可求得 D_{eff} 与 MR 以及 D_{eff} 与 M_t 以及 t 的关系式：

$$D_{\text{eff}} = \frac{r^2}{\pi^2} \cdot \ln\left(\frac{6}{\pi^2} \cdot MR\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (4-15)$$

$$D_{\text{eff}} = \frac{r^2}{\pi^2} \cdot \ln\left(\frac{6}{\pi^2} \cdot \frac{M_t - M_\infty}{M_0 - M_\infty}\right) \cdot \frac{1}{t} \quad (4-16)$$

平均有效水分扩散系数(Average Effective Moisture Diffusivity, D_{avg}) 为不同含水率下所有有效水分扩散系数的算术平均值，计算公式为^[104-106]：

$$D_{\text{avg}} = \frac{1}{n} \left(\sum_1^n D_{\text{eff}} \right) \quad (4-17)$$

为了建立有效水分扩散系数与样品 MC 和温度之间的数学关系，采用回归分析方法，使用多项式指数方程拟合了样品 MC 对有效水分扩散系数的影响。

四阶-多项式方程拟合平均含水率(MC)对 D_{eff} 的影响方程如下^[106]

$$D_{\text{eff}} = A + BM_t + CM_t^2 + DM_t^3 + EM_t^4 \quad (4-18)$$

式中，A、B、C、D 为回归系数。

5.3.5 数学模型建立与分析方法

(1) 动力学模型

如表 5-3 所示，为准确描述与预测核桃热风干燥过程中的水分散失情况，选出 12 个经典的干燥动力学数学模型，使用实时检测到的质量数据对其进行拟合，并根据决定系数(R^2)的最大化，残差平方和(SSE)和均方根误差(RMSE)的最小化，选出最合适的数学模型^[107, 108]。

表 5-3 12 个干燥曲线数学模型

Tab. 5-3 Twelve mathematical models for drying curves

序号	模型名称	模型	参数	
1	Newton	$MR = \exp(-kt)$	k	[109]
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	k、n	[44, 78]
3	Henderson and Pabis	$MR = a \exp(-kt)$	a、k	[110]
4	Two term	$MR = a \exp(k_0 t) + b \exp(k_1 t)$	a、b、 k_0 、 k_1	[111]
5	Two-term exponential	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-kt)$	a、k	[112]
6	Verma et al	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-gt)$	a、g、k	[113]

续表 5-3 12 个干燥曲线数学模型

Tab. 5-3 Twelve mathematical models for drying curves

序号	模型名称	模型	参数	
7	Logarithmic	$MR=a\exp(-kt)+c$	a、c、k	[108, 110]
8	Wang and Singh	$MR=1+at+bt^2$	a、b	[114]
9	Approximation of diffusion	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$	a、b、k	[115]
10	Midilli et al	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$	a、n、k	[116]
11	Modified page	$MR=\exp[-(kt)^n]$	n、k	[107]
12	Weibull distribution	$MR=a-b\exp(-kt^n)$	a、b、k、n	[117]

(2) 有效水分扩散系数模型

使用 MATLAB, 将拟合动力学模型方程代入公式, 进行方程运算和曲线绘制, 得出有效水分扩散系数的变化曲线。

5.4 结果与讨论

5.4.1 山核桃干燥各参数间关系

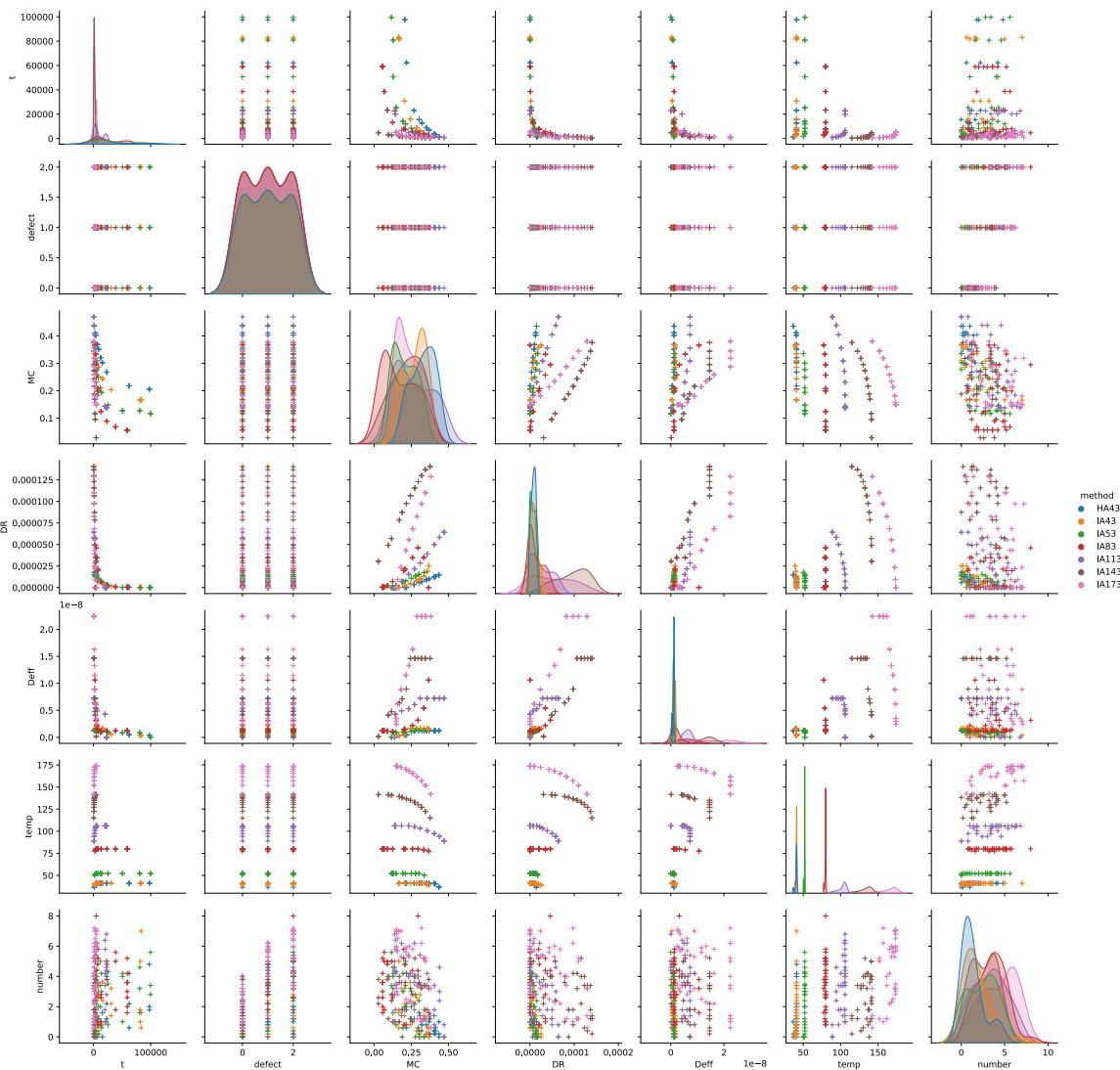


图 5-9 山核桃各干燥参数间矩阵散点图

Fig. 5-9 Matrix scatter plot between each drying parameter of pecan

如图 5-9 所示为山核桃各干燥参数间矩阵散点图，每个图例被赋以不同颜色，各代表一组实验获得的数据，每组实验干燥方式不同，分别为热风(HA)43℃、红外热风(IA)43℃、53℃、83℃、113℃、143℃、173℃；横轴和纵轴标签为干燥过程的七种不同因素，即干燥时间、冲孔形状(0—未联通冲孔的裂纹、1—联通五角星的裂纹、2—联通六角星冲孔的裂纹)、干基含水率(MC)、干燥速率(DR)、有效水分扩散系数(D_{eff})、实时温度(temp)、裂纹数量(number)，散点图中每个裂纹数量点的值为单个采集点下五个核桃样本的平均值，斜对角线上为每种干燥方式的分布图。

图中各变量之间皆呈现不同程度相关性，由于 t 、MC、DR、 D_{eff} 、temp 中，部分关系曲线已在前文绘制，故重点描述和干燥方式(method)、裂纹种类(defect)、裂纹数(number)有关的关系，矩阵散点图体现规律如下：

number 行中：

- ① t 为横坐标时，干燥方式呈聚类分布，预设温度越高，点越向 t 原点方向聚集，说明温度越高，干燥所需时间越短；
- ② defect 为横坐标时，number 最大值单调递增，且呈聚类分布，预设温度越高，点越向 number 正方向聚集，说明预设温度越高，获得更多裂纹数的概率越大；
- ③ MC 为横坐标时，聚类位置表现中，预设温度越高，number 数越大，各组皆呈单调递减趋势，说明裂纹数随含水率减小而增大；
- ④ DR 为横坐标时，预设温度越高，点越稀疏，说明预设温度越高越能达到更高的干燥速率，DR 越大，点越稀疏，说明干燥程度越高，越能得到更多的裂纹；
- ⑤ D_{eff} 为横坐标时，数据分布规律与 DR-number 类似，不同的是，同种预设温度下，数据点多聚集在同一 D_{eff} 最大值处，并向 D_{eff} 原点方向分散，数量关系不明显，还需绘制详细的对应关系图来进一步观察。
- ⑥ temp 为横坐标时，裂纹数随温度减速递增并最终不再随温度变化，而是在恒定预设温度下增加；
- ⑦ 观察 number 分布曲线可知，不同预设温度时，预设温度越高，众数越分布于 number 值大的位置，同一预设温度时，多为双峰，43℃时，高峰位于左侧，且峰值差距交大，大于等于 53℃时，高峰位于右侧，峰值差距皆小于 43℃，但差值大小未观测出变化规律，需进一步找出高峰出现的规律和原因并加以利用，以期在工业破壳中有效控制裂纹数量；

defect 列中：

- ① temp 为纵坐标时，每组在高温阶段分布密度增加，说明温度较高获得裂纹的概率越大；
- ② D_{eff} 为纵坐标时，预设温度越高，越向 D_{eff} 正方向分布，但整体分布密集区在纵轴原点方向，单组分布规律还需具体绘图观察；
- ③ DR 为纵坐标时，预设温度越低越向 DR 原点方向聚集，说明低温不易形成高速，总体低速阶段更密集，说明整体干燥过程中，高速情况较低速情况出现更短暂；
- ④ MC 为纵坐标时，数据点总体均匀分布在中部，这是因为实验时每次采集点含水率几乎相同，同时说明了采集点实现了自动控制，使其分布均匀；两端分布较稀疏，这是由于初始含水率和绝干重量每组实验条件下都不同导致的；

⑤ t 为纵坐标时, 预设温度越高, 数据点越向 t 轴原点方向聚集, 说明温度越高, 干燥所需总时间越短。

综上所述, 预设干燥温度越高, 物料升温越明显, 干燥速度越快, 干燥时间越短, 有效水分扩散系数越高, 终点干基含水率越低, 裂纹数量越多; 不同冲孔形状可生成的裂纹数按从多到少排列为联通六角星冲孔的裂纹>联通五角星冲孔的裂纹>未联通冲孔的裂纹。

5.4.2 含水率拟合模型

(1) 干燥动力学模型拟合参数

如表 5-11 所示, 不同温度和加热方式下最优拟合模型呈现一定规律:

以加热方式为变量观察, 加热温度为 43℃ 时, 热风干燥方法中模型 4 (Two term, $MR=a\exp(k_0t)+b\exp(k_1t)$) 为最适拟合模型; 红外热风加热时, 最适模型为模型 12 (Midilli et al, $MR=a-b\exp(-kt^n)$) 或 10 (Weibull distribution, $MR=a\exp(-kt^n)+bt$)。

红外热风加热时, 以加热温度为变量, 43℃ 至 113℃ 范围内, 山核桃含水率最符合模型 12 (Midilli et al, $MR=a-b\exp(-kt^n)$), 而高温范围内, 143℃ 和 173℃ 条件下, 山核桃含水率最适模型符合模型 10 (Weibull distribution, $MR=a\exp(-kt^n)+bt$)。

可见随着温度变化, 山核桃含水率的干燥动力学模型保持一定的稳定规律, 且随温度上升, 其模型会发生规律性的变化, 此现象还未被其他研究发现。

表 5-4 热风(HA)43℃条件下核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-4 Results of analysis of optimal data on moisture content of walnuts under hot air (HA) conditions at 43°C

序号	拟合模型	均方根	和方差	确定系数
1	$MR=\exp(-kt)$	0.211427736	2723.137403	0.993187126
2	$MR=\exp(-kt^n)$	0.009497966	5.495495272	0.936031548
3	$MR=a\exp(-kt)$	0.018981887	21.94948807	0.745250351
4	$MR=a\exp(k_0t)+b\exp(k_1t)$	0.002919381	0.519191017	0.993955384
5	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kat)$	0.192517361	2257.799837	0.988353577
6	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	0.018979313	21.94353518	0.74531958
7	$MR=a\exp(-kt)+c$	0.003008611	0.551413865	0.993580233
8	$MR=1+at+bt^2$	0.22009337	2950.934423	0.832979061
9	$MR=a\exp(-kt)+(1-a)\exp(-kbt)$	0.018979313	21.94353518	0.745319579
10	$MR=a\exp(-kt^n)+bt$	0.004018513	0.983730865	0.988547638
11	$MR=\exp[-(kt)^n]$	0.242553842	3583.950076	0
12	$MR=a-b\exp(-kt^n)$	0.002999336	0.548019398	0.993619753

表 5-5 红外热风(IA)43°C条件下核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-5 Results of optimal data analysis of moisture content of walnuts under infrared hot air (IA) condition of 43°C

序号	拟合模型	均方根	和方差	确定系数
1	MR=exp(-kt)	0.188741862	1975.073173	0.91392191
2	MR=exp(-kt ⁿ)	0.0091745	4.666717979	0.959594909
3	MR=aexp(-kt)	0.019233533	20.50996166	0.823584819
4	MR=aexp(k ₀ t)+bexp(k ₁ t)	3.31E+140	6.06E+285	0.823584819
5	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat)	0.175016901	1698.26986	0.981094193
6	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.019229801	20.50200347	0.823653337
7	MR=aexp(-kt)+c	0.003711401	0.763699587	0.993385107
8	MR=1+at+bt ²	0.222614954	2747.611908	0.825196299
9	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	0.019229801	20.50200347	0.823653337
10	MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.003086023	0.528013456	0.995426644
11	MR=exp[-(kt) ⁿ]	0.210633613	2459.812898	0
12	MR=a-bexp(-kt ⁿ)	0.002705678	0.405881165	0.996484402

表 5-6 红外热风(IA)53°C条件下核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-6 Results of optimal data analysis of moisture content of walnuts under infrared hot air (IA) condition of 53°C

序号	拟合模型	均方根	和方差	确定系数
1	MR=exp(-kt)	0.147666644	1386.193484	0.806861329
2	MR=exp(-kt ⁿ)	0.015634511	15.53916431	0.913625953
3	MR=aexp(-kt)	0.031768857	64.15968302	0.647287137
4	MR=aexp(k ₀ t)+bexp(k ₁ t)	7.35E+75	3.43E+156	0.647287137
5	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat)	0.14088891	1261.864323	0.896295176
6	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.031764771	64.14318025	0.647376071
7	MR=aexp(-kt)+c	0.004943244	1.553399531	0.991354658
8	MR=1+at+bt ²	0.240808009	3686.386752	0.800982383
9	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	0.031764771	64.14318025	0.647376071
10	MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.007533344	3.607735028	0.979932823
11	MR=exp[-(kt) ⁿ]	0.161852433	1665.319275	0
12	MR=a-bexp(-kt ⁿ)	0.004903529	1.528539219	0.991493016

表 5-7 红外热风(IA)83°C条件下核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-7 Results of analysis of optimal data on moisture content of walnuts under hot air (IA) conditions at 53°C

序号	拟合模型	均方根	和方差	确定系数
1	MR=exp(-kt)	0.103323543	509.9807987	0.703981459
2	MR=exp(-kt ⁿ)	0.014311188	9.783777946	0.947936135
3	MR=aexp(-kt)	0.027915154	37.22504944	0.815987402
4	MR=aexp(k ₀ t)+bexp(k ₁ t)	1.73E+144	1.42E+293	0.815987402
5	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat)	0.097043132	449.8677356	0.792021415
6	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.027907084	37.20353117	0.816080348
7	MR=aexp(-kt)+c	0.007372302	2.596339401	0.986118253
8	MR=1+at+bt ²	2.47E-01	2.90E+03	0.787524662
9	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	0.027907084	37.20353117	0.816080348
10	MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.027907084	37.20353117	0.816080348
11	MR=exp[-(kt) ⁿ]	0.118926422	675.6346974	0
12	MR=a-bexp(-kt ⁿ)	0.004033231	0.77707239	0.995845257

表 5-8 红外热风(IA)113°C条件下核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-8 Results of analysis of optimal data on moisture content of walnuts under hot air (IA) conditions at 113°C

序号	拟合模型	均方根	和方差	确定系数
1	MR=exp(-kt)	0.158731442	392.1706158	0.703981459
2	MR=exp(-kt ⁿ)	0.017160486	4.583616533	0.947936135
3	MR=aexp(-kt)	0.032462537	16.40265104	0.815987402
4	MR=aexp(k ₀ t)+bexp(k ₁ t)	9.33E+132	1.36E+270	0.815987402
5	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat)	0.150064195	350.5123234	0.792021415
6	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	3.25E-02	1.64E+01	0.816080348
7	MR=aexp(-kt)+c	0.004803225	0.359099613	0.986118253
8	MR=1+at+bt ²	0.230705109	828.4447521	0.787524662
9	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	0.03245009	16.39007476	0.816080348
10	MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.006801654	0.72007584	0.816080348
11	MR=exp[-(kt) ⁿ]	0.178609078	496.5422191	0
12	MR=a-bexp(-kt ⁿ)	0.00424852	0.280947047	0.995845257

表 5-9 红外热风(IA)143°C条件下核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-9 Results of analysis of optimal data on moisture content of walnuts under hot air (IA) conditions at 143°C

序号	拟合模型	均方根	和方差	确定系数
1	MR=exp(-kt)	0.150383641	55.00026245	0.71990052
2	MR=exp(-kt ⁿ)	0.044687941	4.856733339	0.800794483
3	MR=aexp(-kt)	0.009395004	0.214663156	0.991467769
4	MR=aexp(k ₀ t)+bexp(k ₁ t)	3.87E+133	3.65E+270	0.991467769
5	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat)	0.134022426	43.68361002	0.772697024
6	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.009395004	0.214663156	0.991467769
7	MR=aexp(-kt)+c	0.007433242	0.134375516	0.994440501
8	MR=1+at+bt ²	0.217339849	114.8794355	0.796174396
9	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	0.009395004	0.214663156	0.991467774
10	MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.007163788	0.124809913	0.994836272
11	MR=exp[-(kt) ⁿ]	0.194280553	91.7956781	0
12	MR=a-bexp(-kt ⁿ)	0.007174991	0.125200568	0.994820095

表 5-10 红外热风(IA)173°C条件下核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-10 Results of analysis of optimal data on moisture content of walnuts under hot air (IA) conditions at 173°C

序号	拟合模型	均方根	和方差	确定系数
1	MR=exp(-kt)	0.175760471	87.73255066	0.897345988
2	MR=exp(-kt ⁿ)	0.018939091	1.018677268	0.903671496
3	MR=aexp(-kt)	0.022917502	1.491601764	0.861223742
4	MR=aexp(k ₀ t)+bexp(k ₁ t)	0.005119309	0.074428806	0.992953409
5	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kat)	0.161115512	73.72131116	0.957894953
6	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-gt)	0.022889625	1.487975164	0.861548382
7	MR=aexp(-kt)+c	0.006752627	0.129498232	0.987739666
8	MR=1+at+bt ²	0.202988918	117.0207824	0.895995044
9	MR=aexp(-kt)+(1-a)exp(-kbt)	0.022889625	1.487975164	0.861548382
10	MR=aexp(-kt ⁿ)+bt	0.005061447	0.072755816	0.993111796
11	MR=exp[-(kt) ⁿ]	0.200756965	114.4615401	0
12	MR=a-bexp(-kt ⁿ)	0.005669068	0.091272877	0.991358678

表 5-11 12 种模型的核桃含水率最优数据分析结果

Tab. 5-11 Results of optimal data analysis of walnut moisture content for 12 models

加热方式	温度	模型	参数	均方根	和方差	确定系数
热风	43	4	$a=0.150328202260693$ $k_0=-6.72237094235181E-5$ $k_1=-4.80026701935407E-7$ $b=0.220086943657404$ $a=0.16247911055715$	0.002919	0.519191	0.993619753
红外热风	43	12	$b=-0.213934426641061$ $k=0.000530809254274432$ $n=0.783872278100321$ $a=0.125198197850296$	0.00270568	0.40588116	0.996484402
红外热风	53	12	$b=-0.243250885538014$ $k=5.5915853667808E-5$ $n=1.04596375077085$ $a=0.350099573214612$	0.004904	1.528539	0.991493016
红外热风	83	12	$b=0.315999257686914$ $k=2130.38965477068$ $n=-0.93848931600836$ $a0.141399894804521$	0.004033	0.777072	0.995845257
红外热风	113	12	$b=-0.231770451930826$ $k=0.000101065068412867$ $n=1.16445923165563$ $a=0.375153477818878$	0.004249	0.280947	0.983941824
红外热风	143	10	$k=0.000187372875835741$ $n=1.11848956132708$ $b=-2.10685553473888E-6$ $a=0.373656754309272$	0.007164	0.12481	0.983941824
红外热风	173	10	$k=0.00043342475620572$ $n=1.03846908944485$ $b=2.90220780603563E-5$	0.005119	0.074429	0.993111796

(1) 拟合曲线

如图 5-10 所示, 不同温度下核桃含水率随时间变化最优拟合曲线, 将各条含水率曲线左右平移至起点对齐, 规律如下:

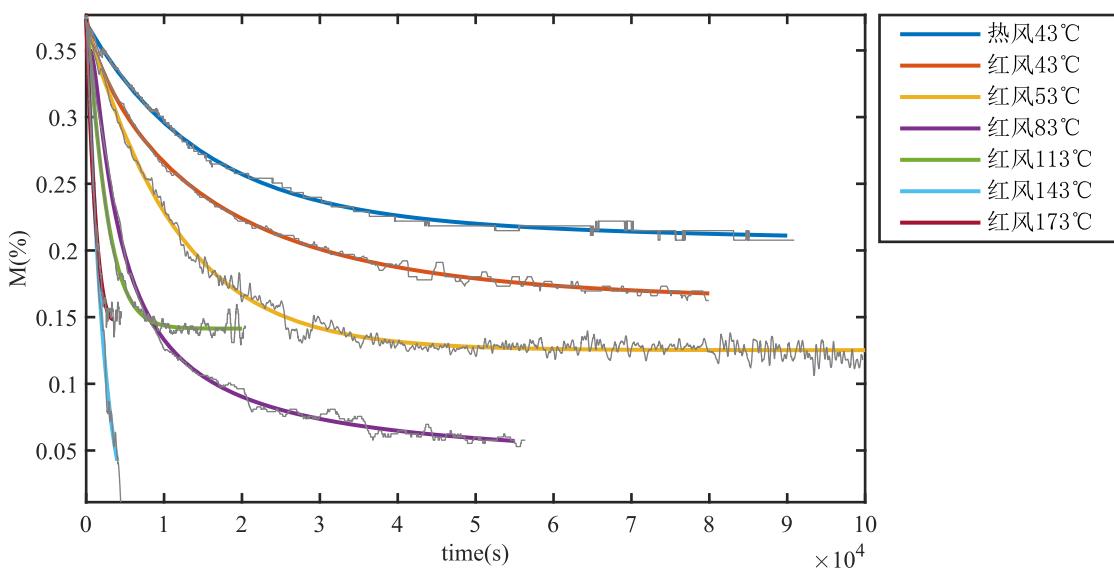


图 5-10 最优干燥动力学模型拟合曲线

Fig. 5-10 Optimal drying kinetic model fitting curve

同为 43 度时，当接近干燥终点，含水率趋近于恒定，热风加热的终点含水率为 0.211136，红外热风加热的中点含水率为 0.167762，可见红外热风干燥法最终含水率比热风干燥低。

同为红外热风加热干燥时，加热终点含水率从高至低依次为：红外热风 53 度，0.125217；红外热风 113 度，0.141408；红外热风 173 度，0.14819；红外热风 83 度 0.0571183；红外热风 143 度 0.02872。

113°C 下核桃最终质量大于 83°C，173°C 下核桃最终质量大于 83°C、113°C 和 143°C，此现象并不符合终点含水率随温度升高而降低的规律。

对于此现象形成的原因有如下猜想：由于实验核桃的批次不同，即红外热风 143 度和红外热风 173 度时实验选用的核桃样品含有部分坏仁，坏核桃仁持有结合水的能力有限，所以在前期干燥过程中失去自由水部分后，可损失的结合水少于正常核桃仁，导致高温后期阶段，可损失的结合水少于红外热风 83 度和红外热风 143 度。

5.4.3 有效水分扩散系数模型

核桃的热风干燥过程主要处在降速阶段，这说明内部的扩散是水分移动主要的形式，水分迁移主要由内部扩散控制，一般与温度和含水率具有很强的相关性^[118]，因此，对果壳、果仁及核桃的干燥过程的有效水分扩散系数进行比较和分析，有利于更合理地控制干燥参数，改进干燥工艺和方法，提高干燥效率。如表 5-12 所示为有效水分扩散系数回归拟合结果数据。

表 5-12 有效水分扩散系数拟合参数

Tab. 5-12 Effective moisture diffusion coefficient fitting parameters

加热方式	温度(℃)	参数	确定系数	均方根
热风	43	A=-1.19345×10 ⁻⁷ B=1.35848×10 ⁻⁶ C=-4.07902×10 ⁻⁶ D=-2.18182×10 ⁻⁶ E=1.77730×10 ⁻⁰⁵ A=1.9791510 ⁻⁸ B=-5.34672×10 ⁻⁷	0.94899	1.81271×10 ⁻¹⁸
红外热风	43	C=5.11457×10 ⁻⁶ D=-2.07147×10 ⁻⁵ E=3.05085×10 ⁻⁰⁵ A=1.97915×10 ⁻⁸ B=-5.34672×10 ⁻⁷	0.99116	2.17897×10 ⁻¹⁹
红外热风	53	C=5.11457×10 ⁻⁶ D=-2.07147×10 ⁻⁵ E=3.05085×10 ⁻⁰⁵ A=-1.39000×10 ⁻³ B=4.30500×10 ⁻²	0.97971	2.42617×10 ⁻¹⁵
红外热风	83	C=-4.99840×10 ⁻¹ D=2.57764×10 E=-4.98170×10 A=5.95671×10 ⁻⁹ B=-1.29230×10 ⁻⁷	0.99397	8.46775×10 ⁻¹⁹
红外热风	113	C=1.18572×10 ⁻⁶ D=-4.53387×10 ⁻⁶ E=6.40398×10 ⁻⁰⁶ A=-1.44674×10 B=4.08199×10 ⁺²	0.99397	8.46775×10 ⁻¹⁹
红外热风	143	C=-4.31900×10 ⁺³ D=2.03101×10 ⁺⁴ E=-3.58154×10 ⁺⁴ A=-5.70261×10 ⁻⁷ B=1.03288×10 ⁻⁵	0.99257	1.53441×10 ⁻¹⁷
红外热风	173	C=-6.84711×10 ⁻⁵ D=1.99227×10 ⁻⁴ E=-2.12521×10 ⁻⁴	0.98481	8.90496×10 ⁻¹⁷

如图 5-11 所示为核桃在热风干燥过程中水分有效扩散系数随干基含水率的变化规律, 结果表明:

- ① 在高水分范围(对应于第一降速期), D_{eff} 值随 M_t 的减小而缓慢减小;
- ② 在低水分范围(对应于第二降速期), D_{eff} 值随 M_t 的减小而急剧下降;
- ③ 这些图形符合前述干燥速率曲线, 并根据干燥理论^[119, 120]被认为是液体扩散的指标;

④ 同为 43℃时，红外热风加热方式比热风加热方式 D_{eff} 值更大，说明红外热风条件更有利于水分迁移；

⑤ 所有温度条件下，温度越高， D_{eff} 在缓速增长期阶段数值越大，可见温度越高越有利于水分迁移；

⑥ 43℃、53℃、83℃、143℃时， D_{eff} 的起点在横轴上的值随环境温度增加而减小；

⑦ 43℃、53℃、83℃时， D_{eff} 的终点在横轴上的值随环境温度增加而增加；

⑧ 高温条件下，即 113℃、143℃、173℃时， D_{eff} 起、终点变化规律不定，猜测为山核桃不同批次中核桃仁存在坏仁导致的；

⑨ 本研究中确定的核桃各异质结构的有效水分扩散系数均在典型的坚果有效水分扩散系数范围($1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$)内，包括澳洲坚果^[121, 122]、迪卡坚果^[123]。

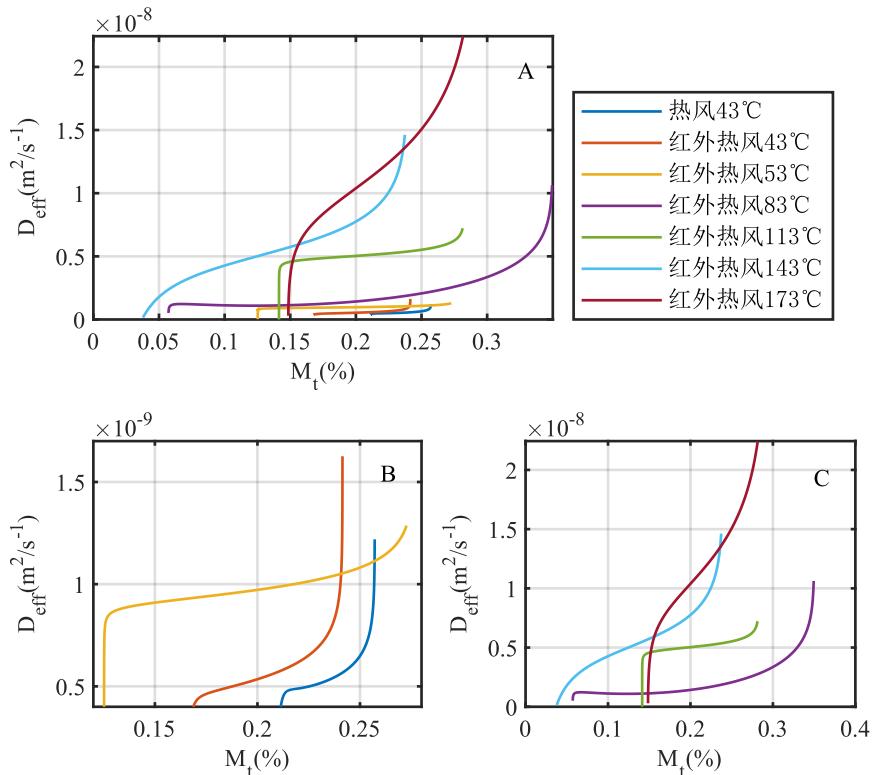


图 5-11 有效水分扩散系数

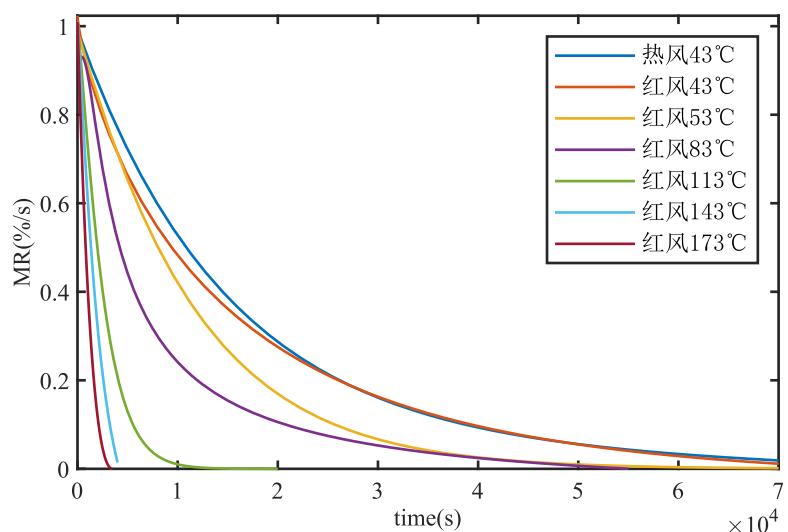
Fig. 5-11 Effective moisture diffusivity

5.4.4 干燥速率

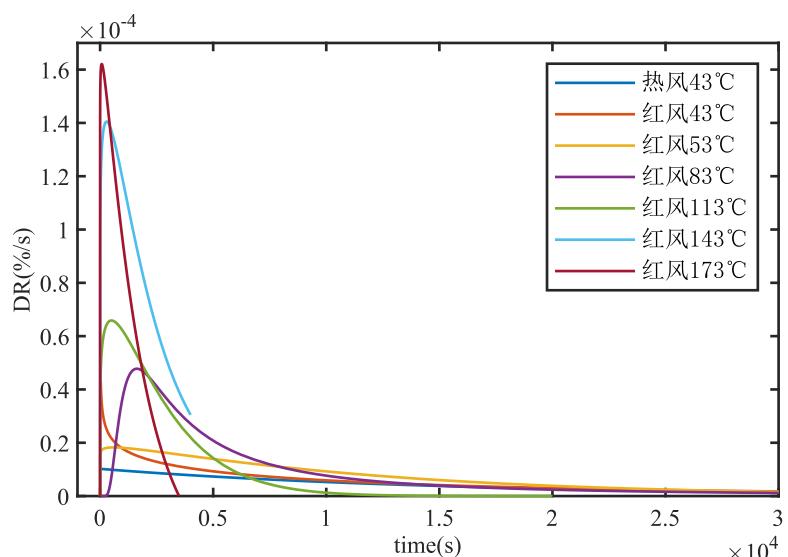
如图 5-12 所示为不同温度下归一化处理后的湿基含水率变化曲线和干基含水率速率变化曲线，规律如下：

① 各条曲线都符合干燥速率随温度增长而变大的规律。

- ② 同在 43℃ 加热条件下，红外加热方式比热风加热方式干燥速率更快
- ③ 观察湿基含水率曲线分布，173℃、143℃ 和 113℃ 较为接近，43℃ 下热风和红外热风曲线较为接近，53℃ 和 83℃ 下曲线和其他温度分布差异较大。
- ④ 观察速率峰值分布，173℃ 和 143℃、43℃ 和 53℃ 以及 83℃ 和 113℃ 加热条件下最高干燥速率接近，三组之间峰值差异较大，且 83℃ 和 113℃ 峰值分布较均匀



(a) 湿基含水率变化曲线



(b) 干基含水率变化速率曲线

图 5-12 湿基含水率和干基含水率变化速率

Fig. 5-12 The curves of wet base moisture content and dry base moisture content

综上，若考虑能耗比和加热效果，宜选用 83℃ 作为工业干燥参数。

5.4.5 温度变化规律

如图 5-13 所示为不同温度下的核桃温度记录数据，对温度曲线做平滑处理可分别得到便于观察的三条温度曲线（图 5-14）。每次打开干燥箱取出干燥样品时，会造成短时间的温度波动。升温阶段，空气温度波动最大，壳表面温度波动次之，核桃仁温度波动最小；恒温状态时，壳表面的温度波动最大，空气温度波动次之，核桃仁温度波动最小。

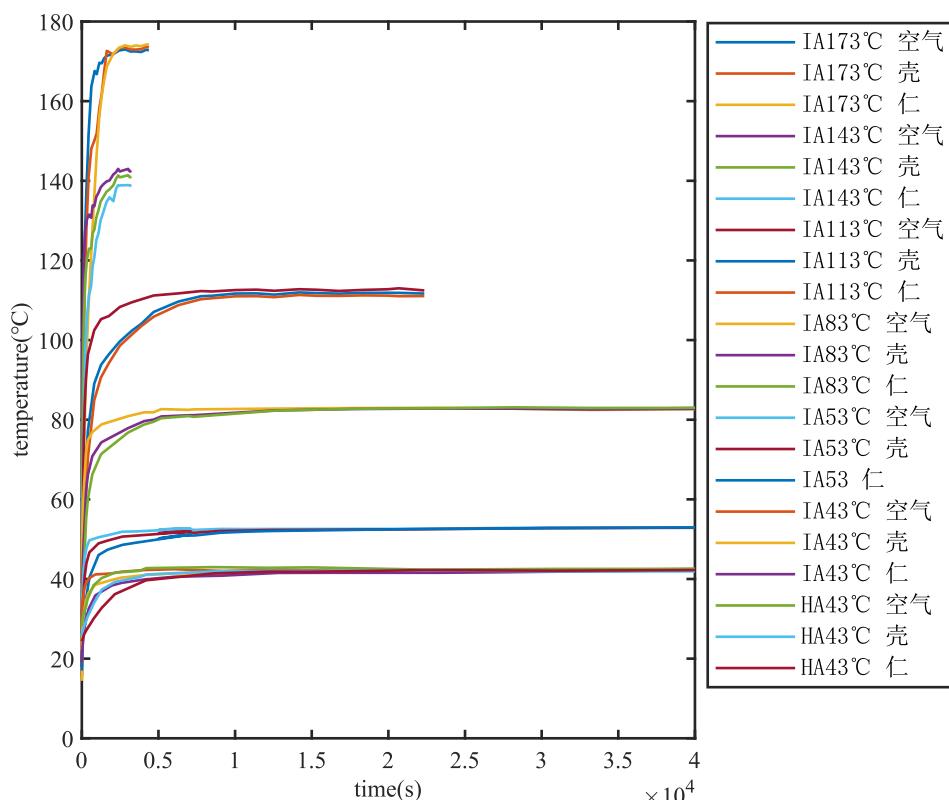


图 5-13 7 种不同温度下空气、壳、仁温度记录

Fig. 5-13 Air, shell and kernel temperature records at 7 different temperatures

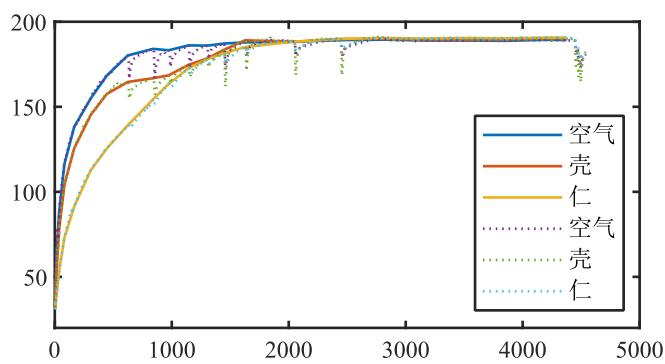


图 5-14 温度曲线平滑处理效果图

Fig. 5-14 Temperature curve smoothing effect

木材是具有纤维结构的多孔材料，随着温度的升高，热流通过木材固相传递增加，同时木材中的孔隙随着温度的升高也会逐渐增加，通过空隙中气体分子的传热过程也逐渐增强，这两种传热方式的综合效应致使木材的表观导热系数随温度的升高而快速增加，直至达到一个峰值，在这个阶段主要以固相物质中的导热为主。所以核桃壳是因为导热率的增加导致恒温阶段，高温时温度波动值增大。

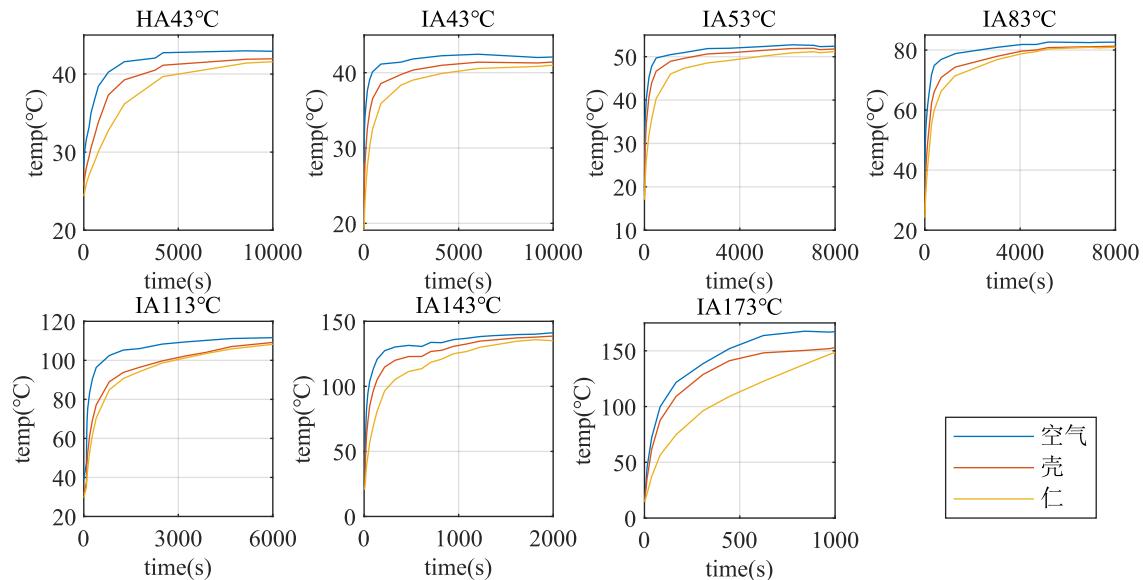


图 5-15 空气、壳、仁升温阶段温度变化曲线

Fig. 5-15 Temperature change curve of air, shell and kernel warming stage

如图 5-15 所示，为空气、壳、仁升温阶段温度变化曲线，规律如下：

- ① 温度在核桃仁和核桃壳表面位置是相似的，样品温度在干燥基本完成后三者才达到烘箱温度。
- ② 核桃壳附近空气温度受水分排除影响，略低于烘箱整体温度，并随核桃温度变化共同升温。
- ③ 升温阶段，预设温度越高，升温速度越快。
- ④ 升温阶段，干燥箱内不同位置温度为：空气温度>核桃壳外表面温度>核桃仁温度。
- ⑤ 173°C、53°C 条件下，核桃壳的温度与空气温度接近；而 113°C、83°C 条件下，核桃壳的温度与核桃仁更加接近；43°C 和 143°C 条件下，三者温度分布较为平均。

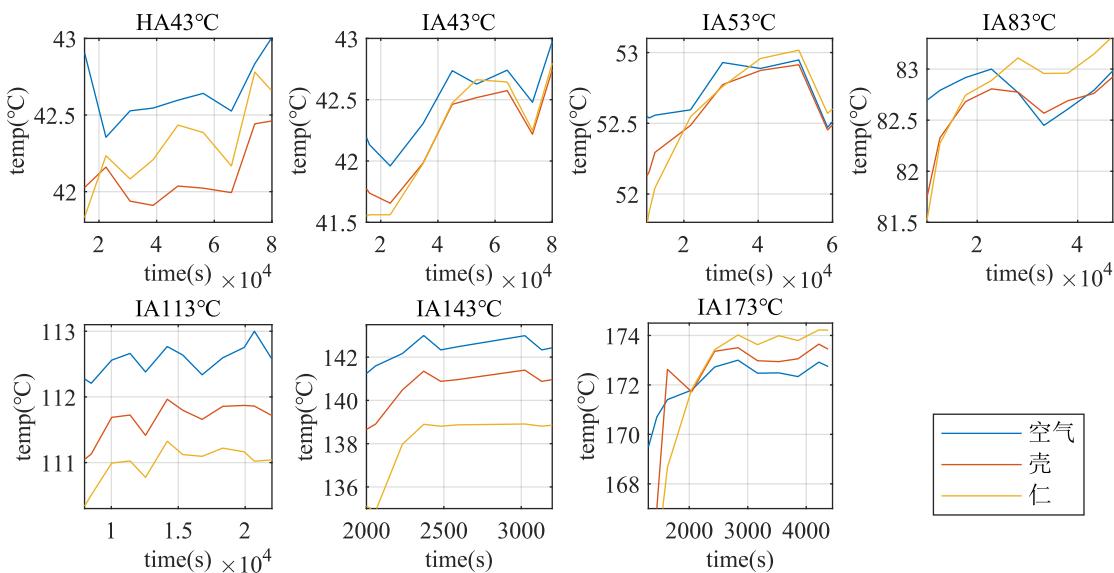


图 5-16 空气、壳、仁恒温阶段温度变化曲线

Fig. 5-16 Temperature change curve of air, shell and kernel constant temperature stage

如图 5-16 所示, 为恒温阶段空气、核桃壳、核桃仁温度变化曲线, 规律如下:

- ① 113°C、143°C 加热条件下, 始终保持空气温度>核桃壳外表面温度>核桃仁温度。
- ② 核桃仁终点温度值跃居首位的条件包括: 预设温度值 53°C、83°C、173°C。
- ③ 终点温度满足持空气温度>核桃仁温度>核桃壳外表面温度的条件包括: 热风和红外热风 43°C。
- ④ 温度增长速度特征中可以看出, 核桃仁温度变化较为活跃, 核桃壳次之。
- ⑤ 猜测造成此现象的原因是恒温阶段, 核桃壳对内部核桃仁构成温度保护, 使核桃仁内部的温度得以积累。

由于提前开启器热风干燥箱至指定预制温度, 且核桃含水量整体较小, 全程湿度值为 1%。

5.4.6 裂纹数与干燥方式以及冲孔形状之间关系

使用本章所述算法识别获得每枚核桃样品的三种裂纹数量, 将其与加热时间、冲孔方式、加热方式、温度、含水率、含水率变化速率以及有效水分扩散系数等因素整合, 综合分析不同处理方式及因素对裂纹数量的影响。

由于核桃每个个体之间存在差异性, 导致相同条件下加热产生的裂纹数未必相同, 所以单个核桃数据可靠性底; 故识别每枚核桃上的三类裂纹数量后, 将每个采集点的 5 枚核桃的裂纹数据求平均数, 用此平均数代表单个采集节点下核桃会产生

的裂纹数量。以下涉及到的所有单个采集节点下的裂纹数量，为求均值后的裂纹数量。

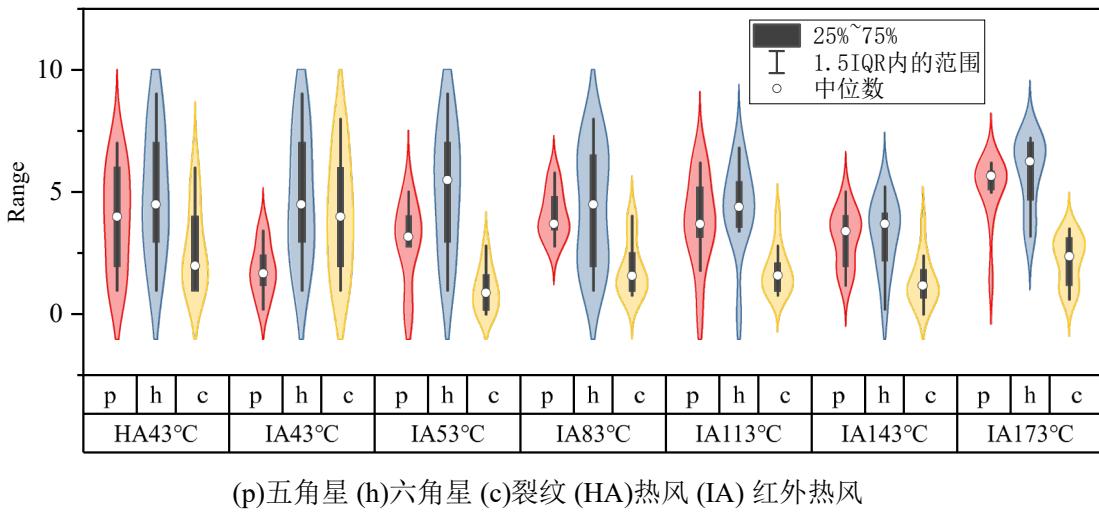


图 5-17 不同类型裂纹分布小提琴图

Fig. 5-17 Crack number distribution violin diagram

如图 5-17 所示为由热风 43℃ 以及红外热风 43℃、53℃、83℃、113℃、143℃、173℃ 条件下，全部加热阶段中，五角星冲孔、六角型冲孔和非冲孔产生的裂纹数量绘制的小提琴图。为便于描述，以下简称联通五角星冲孔的裂纹为 p；联通六角型冲孔的裂纹为 h；未联通冲孔的裂纹为 c。由图可观察到的信息如下：

- ① 每组温度条件下，由小提琴图峰值分布可知，三种裂纹产生的概率从高到低依次为：h>p>c；
- ② 每组温度条件下，三种裂纹数量的中位数由高到低依次为：h>p>c；
- ③ 所有实验条件下，h 的 25%~75% 密度范围高于其他两种裂纹，红外热风 53℃、83℃ 下，h 分布比同组 p、c 更广泛，热风 43℃、红外热风 113℃、143℃ 条件下，p 和 c 分布广泛度相似，且明显高于 c，红外热风 43℃、173℃ 条件下，h 和 c 分布广泛度相似，且明显高于 p；
- ④ 单独观察 h 的表现，低温 43℃~83℃ 范围内，数据较分散，其中 43℃ 时峰值位置低于中位数，53℃ 时峰值略高于中位数；低温向高温过渡时，即 83℃ 时，出现双峰值，中位数位于双峰值之间；高温 113℃~173℃ 范围内，数据较集中，且峰值向高于中位数的位置偏移；
- ⑤ 只有红外热风 43℃ 条件下，c 超过 p 且数值与 h 非常接近。

综上可得出结论，有六角星型冲孔的核桃再加热过程中有更大概率产生基于冲孔扩展的裂纹，其中红外热风条件下 53℃ 和 173℃ 表现最好，适用于作为核桃工业加工中储存干燥和熟制干燥的加热参考条件。

5.4.7 裂纹数与含水率之间关系

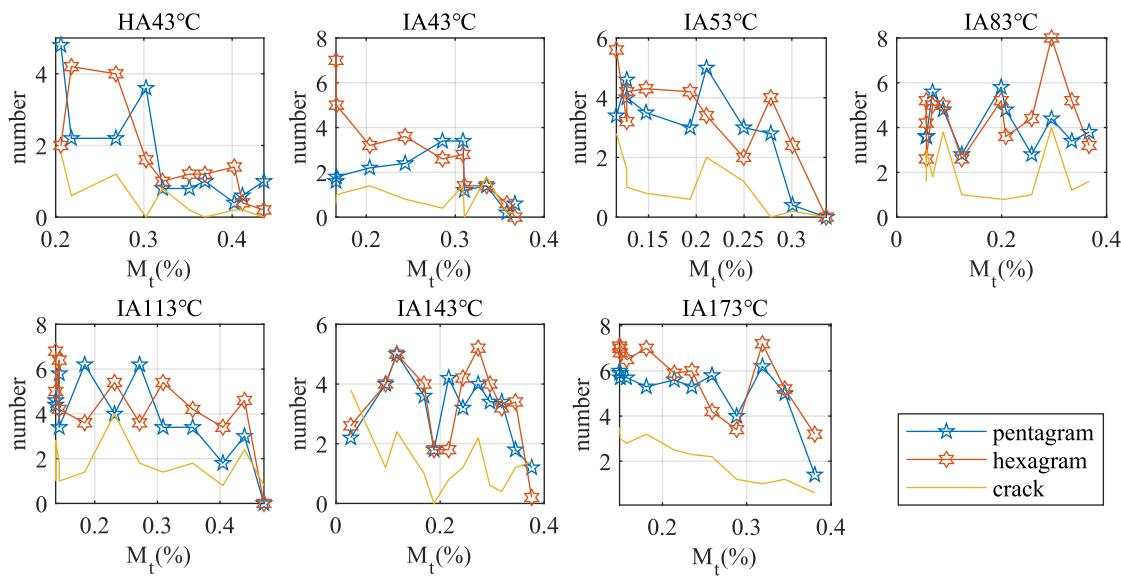


图 5-18 不同类型裂纹数量与干基含水率之间关系

Fig. 5-18 Relationship between the number of different cracks and the moisture content of the dry base

如图 5-18 所示, 为不同类型裂纹数量与干基含水率之间的关系折线图, 由图可知:

- ① 7 种加热方式中, 裂纹数量总体表现为 c 值全程低于 p、h 值, p、h 值相互交错, 多数情况下 h 值高于 p 值;
- ② 数量陡增的情况多出现在右数第二、三个点位, 此阶段对应初期增速干燥阶段, 后裂纹数量增速放缓, 故猜测是加速干燥时核桃壳作为水分中转站, 传递大量来自核桃仁的水分进入外界空气, 且由于冲孔的存在, 热固耦合条件核桃壳表面出现大量热应力分布不均的现象, 这促进了裂纹在此阶段大量产生, 而到了干燥的中后期, 干燥速率放缓, 核桃壳需要中转的水分变少, 且冲孔和已形成的裂纹可作为排出水分的主要通道, 故裂纹数量缓慢增加, 干燥后期甚至几乎停止增加;
- ③ 未联通冲孔的裂纹数折线变化规律相似于 p 或 h 曲线, 可见冲孔对于纯裂纹的产生具有强相关性, 这是因为 c 为冲孔产生裂纹的基础上发生的裂纹联通和扩展, 可见冲孔是新裂纹的产生的“因变量”, 冲孔的存在不仅可以以冲孔为起点萌生裂纹, 还可在此裂纹分布基础上, 裂纹和冲孔之间相互影响, 产生更多不与冲孔联通的新裂纹。
- ④ 分别对应存储需求和数值需求时, 包含低温干燥和高温加热两种加工需求, 裂纹数量最大值时对应的参数为: 83℃含水率 0.295% 时裂纹数为 8 条、173℃含水率 0.319% 时裂纹数为 7.2 条。

5.5 本章小结

本章基于第二章的预实验结果，对核桃两侧分别进行五角星和六角星冲孔处理，并采用热风和红外热风两种方式对核桃进行加热，并利用第三章所阐述的信息采集平台进行数据收集，得到如下结论：

(1) 山核桃含水率的干燥动力学模型保持一定的稳定规律，且随温度上升，其模型会发生规律性的变化

(2) 核桃各异质结构的有效水分扩散系数均在典型的坚果有效水分扩散系数范围($1\times10^{-7}\sim1\times10^{-10}m^2/s$)内

(3) 干燥速率随温度增长而变大， 43°C 加热条件下，红外加热方式比热风加热方式干燥速率更快

(4) 升温阶段，空气温度波动最大，壳表面温度波动次之，核桃仁温度波动最小；恒温状态时，壳表面的温度波动最大，空气温度波动次之，核桃仁温度波动最小。

(5) 预设干燥温度越高，物料升温越明显，干燥速度越快，干燥时间越短，有效水分扩散系数越高，终点干基含水率越低，裂纹数量越多；不同冲孔形状可生成的裂纹数按从多到少排列为联通六角星冲孔的裂纹>联通五角星冲孔的裂纹>未联通冲孔的裂纹；

(6) 红外热风条件下有六角星型冲孔的核桃在加热过程中有更大概率产生基于冲孔扩展的裂纹，其中 83°C 含水率0.295%、 173°C 含水率0.319%时表现最好，适用于作为核桃工业加工中储存干燥和熟制干燥的加热参考条件；

(7) 冲孔的存在不仅可以以冲孔为起点萌生裂纹，还可在此裂纹分布基础上，裂纹和冲孔之间相互影响，产生更多不与冲孔联通的新裂纹。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本文通过查阅相关文献，了解国内外坚果破壳装备和裂纹研究的现状和方法，结合断裂理论以及课题组研究基础，发现研究多边形冲孔形状和干燥方式产生的裂纹对破壳有一定指导意义。参考国内外研究方法，制定研究思路和方案。并通过预实验确定了冲孔形状和干燥方式，为采集研究所需实验数据，设计并搭建了两套核桃综合信息采集平台，用于后续研究山核桃近红外热风干燥特性的信息采集。本文利用实验采集得到的图像信息与深度学习相结合，进行裂纹识别与检测，并对比了三种深度学习算法。通过本文研究，得出以下结论：

(1) 五角星和六角星两种冲孔形状进行预制裂纹处理能获得更多符合预期的预制裂纹数目。红外热风干燥法和热风干燥法可获得更多裂纹，其中红外热风干燥法更优。

(2) 设计并搭建了一个核桃综合信息采集平台，该综合信息采集平台主要包括：核桃干燥实时信号采集系统，该部分是对核桃干燥过程的信号进行采集，以便阶段对核桃取出进行后续信息采集；图像采集系统，该部分对大量核桃的裂纹形貌信息进行采集，以为后续深度学习提供数据；含水率采集设备，这部分是对干燥后核桃、核桃壳和核桃仁的含水率进行采集，并且不需要完整破壳即可实现信息采集。

(3) YOLOv8 算法在准确率、召回率、F1 值和 mAP 等指标上均表现最好，而且推理速度最快；利用 SSD 算法、Faster R-CNN 算法和 YOLOv8 算法三种算法在测试集上对目标检测结果进行对比，结果发现 YOLOv8 算法能够检测到更多的裂纹，且检测结果更准确。

(4) 山核桃含水率的干燥动力学模型保持一定的稳定规律，且随温度上升，其模型会发生规律性的变化；核桃各异质结构的有效水分扩散系数均在典型的坚果有效水分扩散系数范围(1×10^{-7} ~ $1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$)内，干燥速率随温度增长而变大；43℃加热条件下，红外加热方式比热风加热方式干燥速率更快。升温阶段，空气温度波动最大，壳表面温度波动次之，核桃仁温度波动最小；恒温状态时，壳表面的温度波动最大，空气温度波动次之，核桃仁温度波动最小，预设干燥温度越高，物料升温越明显，干燥速度越快，干燥时间越短，有效水分扩散系数越高，终点干基含水率越低，裂纹数量越多；使用冲孔方式预制裂纹获得的不同种类裂纹数量按从多到少排列为联通六角星冲孔的裂纹>联通五角星冲孔的裂纹>未联通冲孔的裂纹；红外热风条件下有六角星型冲孔的核桃在加热过程中有更大概率产生基于冲孔扩展的裂

纹，其中 83℃含水率 0.295%、173℃含水率 0.319%时表现最好，适用于作为核桃工业加工中储存干燥和熟制干燥的加热参考条件。

6.2 展望

本课题较为深入的研究了核桃的干燥特性，并分别建立了干燥模型，同时分析了干燥时核桃裂纹与干燥特性参数间关系，并在此基础上优化出一套面向核桃破壳的干燥工艺参数。但是由于时间及物力条件的限制，本课题还应在以下几个方面进一步完善：

- (1) 预制裂纹所使用的手动冲孔台，还需进一步优化为自动化冲孔设备。因此，后续研究中应该对此新型破壳装置进行研发，使此方法可用于批量化核桃加工。
- (2) 在分析干燥特性参数时，可分别观察对比核桃壳和仁的含水率，研究异质结构失水过程对核桃破碎效果影响的原理。
- (3) 未来应进一步研究预制裂纹后，核桃壳振动破碎阶段提高整仁率的工艺参数。

参考文献

- [1]宋岩, 王小红, 张锐, 等. 新疆核桃品种间品质差异比较[J]. 中国粮油学报, 2019(08): 91-97.
- [2]SEN M, KARADENIZ T. The nutritional value of walnut[J]. Journal of Hygienic Engineering and Design, 2015(10): 68.
- [3]朱德泉, 马锦, 蒋锐, 等. 山核桃坚果分段变功率微波干燥工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2016(15): 268-274.
- [4]王莺. 宁国市山核桃产业可持续发展思考与建议[J]. 安徽农学通报, 2020(06): 68-69.
- [5]杨集明. 宁国山核桃种植现状及发展对策[J]. 安徽农学通报, 2018(21): 118-119.
- [6]李虹清, 柴秋萍. 宁国市全国绿色食品原料(山核桃)标准化生产基地建设实践和对策[J]. 安徽农学通报, 2020(14): 64-65.
- [7]郗静. 宁国山核桃产业发展现状及产业振兴对策[J]. 安徽农学通报, 2020(24): 94-95.
- [8]韩建华. 宁国市现代山核桃科技示范基地建设及成效分析[J]. 现代农业科技, 2021(18): 148-149.
- [9]曹成茂, 罗坤, 彭美乐, 等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J]. 农业机械学报, 2019(09): 105-112.
- [10]CHENGMAO C, SI S, RAN D, et al. Experimental study on mechanical characteristics of nut rupturing under impact loading[J]. Int J Agric & Biol Eng, 2017(10): 53-60.
- [11]曹成茂, 蒋兰, 吴崇友, 等. 山核桃破壳机加载锤头设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017(10): 307-315.
- [12]曹成茂, 李正, 罗坤, 等. 山核桃二次破壳取仁机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019(03): 128-135.
- [13]彭美乐. 冲击力下山核桃裂纹产生与扩展规律的实验研究[D]. 安徽农业大学, 2021.
- [14]Fast location and classification of small targets using region segmentation[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 263.
- [15]ZHANG H, SHEN L, LAN H, et al. Mechanical properties and finite element analysis of walnut under different cracking parts[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018(6): 81.
- [16]侯朝雷, 相海, 王俊海, 等. 基于核桃特性分析的核桃破壳装置设计[J]. 农业工程, 2019, 9(02): 45-50.
- [17]刘明政, 李长河, 曹成茂, 等. 核桃分级破壳取仁及壳仁分离关键技术与装置研究进展[J]. 农业工程学报, 2020(20): 294-310.

- [18] VOJVODIĆ C A, MARIE-CHRISTINE R, JACQUELINE V, et al. Valorisation of walnut shell and pea pod as novel sources for the production of xylooligosaccharides[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 263.
- [19] 孙偲, 曹成茂, 娄帅帅, 等. 山核桃破壳力学性能试验[J]. 安徽农业大学学报, 2016(02): 331-336.
- [20] M. A K, K. E, E. S. Cracking Characteristics of Walnut[J]. Biosystems Engineering, 2003, 87(3).
- [21] SHAHBAZI F. Effects of Moisture Content and Impact Energy on the Cracking Characteristics of Walnuts[J]. International Journal of Food Engineering, 2014(1): 149-156.
- [22] 刘奎, 郭文川, 朱占江. 新丰核桃的多因素压缩试验[J]. 食品与机械, 2020(03): 124-128.
- [23] 乔园园, 史建新, 董远德. 影响核桃壳仁脱离的主要因素[J]. 农机化研究, 2008(04): 43-45.
- [24] 沈柳杨, 张宏, 李勇, 等. 不同含水率下温185核桃仁力学特性试验研究[J]. 河南农业科学, 2016, 45(07): 143-147.
- [25] 郑霞, 张恩铭, 坎杂, 等. 适宜核桃壳划口位置改善其破壳特性提高整仁率[J]. 农业工程学报, 2018(19): 300-308.
- [26] 沈柳杨. 冲压式核桃破壳机的设计及试验研究[D]. 塔里木大学, 2017.
- [27] SHAHBAZI F. Effective conditions for extracting higher quality kernels from walnuts[J]. Quality Assurance and Safety of Crops & Foods, 2013(1): 199-206.
- [28] 周军, 史建新. 影响气爆式核桃破壳取仁的因素探究[J]. 农机化研究, 2015(06): 201-203.
- [29] HONG Z, LIUYANG S, HAIPENG L, et al. Mechanical properties and finite element analysis of walnut under different cracking parts[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6).
- [30] 董诗韩. 多辊挤压式核桃破壳机的设计及试验研究[D]. 新疆农业大学, 2011.
- [31] 何义川. 气动击打式核桃破壳机的设计及试验研究[D]. 新疆农业大学, 2010.
- [32] 李筱薇. 间隙挤压式核桃脱壳机的参数优化试验研究[D]. 四川农业大学, 2018.
- [33] 刘明政. 核桃剪切挤压柔性破壳取仁的机理分析与实验研究[D]. 青岛理工大学, 2015.
- [34] 周军. 气爆式核桃破壳方法的试验研究[D]. 新疆农业大学, 2015.
- [35] ALLEN L. New walnut drying method shows promise[J]. Southeast Farm Press, 2021(1).
- [36] 周良付, 赵茜茜, 曲文娟, 等. 核桃干燥技术研究进展[J]. 食品工业, 2021(08): 254-258.
- [37] FAZIA T, AHMAD K S, HUSSAIN D A, et al. Refractance window drying of walnut kernel (*Juglans regia* L.)[J]. Discover Food, 2023, 3(1).
- [38] JIN W, PEI J, WANG S, et al. Effect of continuous and intermittent drying on water mobility of fresh walnuts (*Juglans regia* L.): A LF-NMR study[J]. Drying Technology, 2020, 40(2).
- [39] 何爱民, 吉洋洋, 李娜, 等. 烤制工艺对烤核桃品质影响机理的研究[J]. 食品工程, 2021(01): 29-33.

- [40]徐晓琳. 加工工艺及储藏因素对风味核桃氧化及风味的影响[D]. 北京林业大学, 2019.
- [41]ATUNGULU G G, TEH H E, WANG T, et al. Infrared Pre-Drying and Dry-Dehulling of Walnuts for Improved Processing Efficiency And Product Quality[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013,29(6).
- [42]朱德泉, 曹成茂, 丁正耀, 等. 山核桃坚果热风干燥特性及其工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2011(07): 364-369.
- [43]CHANG C, ZHANG W, CHANDRASEKAR V, et al. Walnut structure and its influence on the hydration and drying characteristics[J]. Drying Technology, 2020,38(8).
- [44]马锦, 卞韶雷, 朱德泉, 等. 山核桃微波干燥动力学模型研究[J]. 食品工业科技, 2015(05): 108-112.
- [45]CHEN C, VENKITASAMY C, ZHANG W, et al. Effective moisture diffusivity and drying simulation of walnuts under hot air[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020,150: 119283.
- [46]满晓兰, 李龙, 张宏, 等. 基于结构异质性的核桃热风干燥特性及数学模型[J]. 江苏农业学报, 2021(03): 731-738.
- [47]CHANG C, SHRINIVASA U, RAGAB K, et al. Simulation of walnut drying under hot air heating using a nonequilibrium multiphase transfer model[J]. Drying Technology, 2022,40(5).
- [48]KHIR R, PAN Z, ATUNGULU G G, et al. Size and Moisture Distribution Characteristics of Walnuts and Their Components[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013(3): 771-782.
- [49]MAMANI I. Modeling of Thermal Properties of Persian Walnut Kernel as a Function of Moisture Content and Temperature Using Response Surface Methodology[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2015(6)56-97.
- [50]卢映洁, 任广跃, 段续, 等. 热风干燥过程中带壳鲜花生水分迁移特性及品质变化[J]. 食品科学, 2020(07): 86-92.
- [51]刘宇飞, 樊健生, 聂建国, 等. 结构表面裂缝数字图像法识别研究综述与前景展望[J]. 土木工程学报, 2021(06): 79-98.
- [52]熊慧江. 基于机器视觉的表面缺陷检测方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [53]罗东亮, 蔡雨萱, 杨子豪, 等. 工业缺陷检测深度学习方法综述[J]. 中国科学:信息科学, 2022(06): 1002-1039.
- [54]杨盛良, 刘军, 杨德明, 等. 复合材料损伤过程的声发射研究方法[J]. 无损检测, 2000(07): 303-306.
- [55]赵慧芳. 基于结构特征的多晶硅电池片近红外图像裂纹缺陷检测[D]. 河北工业大学, 2019.
- [56]何慧玲. X射线图像裂纹缺陷检测的研究[D]. 中南民族大学, 2021.

- [57]张凯. 基于激光扫描红外无损检测技术的裂纹缺陷检测[D]. 电子科技大学, 2020.
- [58]陈威. 基于压缩感知的光谱成像技术研究[D]. 湖州师范学院, 2022.
- [59]代云峰. 压力容器无损检测渗透检测技术综述[J]. 冶金与材料, 2021,41(04): 119-120.
- [60]黄心敏. 快速检测技术在稻米品质检测中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022,35(05): 20-22.
- [61]姜水. 基于电子鼻技术的山核桃内部品质快速无损检测方法的研究[D]. 浙江大学, 2018.
- [62]吴莉莉, 李辉, 惠国华, 等. 传感器技术在农产品无损检测中的应用研究[J]. 江西农业学报, 2010,22(05): 101-105.
- [63]郭庆林, 李晓旭, 李懿明, 等. 干湿循环作用下沥青混合料损伤开裂机制分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2023,42(01): 61-67.
- [64]崔帆, 田勇, 曹宪周. 粮食颗粒力学特性与其破碎关联性研究进展[J]. 中国粮油学报, 2018,33(12): 142-146.
- [65]李兴军. 粮粒水分扩散方程的由来及研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2018,43(2): 83-88.
- [66]周显青, 孙晶, 张玉荣. 国内外稻米籽粒力学特性评价技术的现状与展望[J]. 粮食与饲料工业, 2018(12): 4-10.
- [67]SUN T, LING F. Optimization method of microwave drying process parameters for rice[J]. QUALITY ASSURANCE AND SAFETY OF CROPS & FOODS, 2021,13(3): 10-20.
- [68]WANG H, CHE G, WAN L, et al. Effect of variable temperature levels on drying characteristics and quality indices of rice in continuous drying and multi-stage intermittent drying[J]. JOURNAL OF FOOD PROCESS ENGINEERING, 2022,40(5).
- [69]廖万能. 引线框架用高性能Cu-Ni-Si合金带材短流程制备工艺与组织性能研究[D]. 北京科技大学, 2021.
- [70]侯晋雄. 热机械处理Al_xCoCrFeNi (x=0.1~0.8) 高熵合金的显微组织及力学性能[D]. 太原理工大学, 2020.
- [71]MENAA B, TAKAHASHI M, TOKUDA Y, et al. High dispersion and fluorescence of anthracene doped in polyphenylsiloxane films[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2006,39(2): 185-194.
- [72]CHEN J, BEATSON R P, TAM K, et al. Kraft pulping of softwood chips with mild hot water pre-hydrolysis to understand the effects of wood chip thickness[J]. BioResources, 2022,17(4): 6303-6324.
- [73]李潇. 金属箔冲裁过程的介观变形特征及损伤机理研究[D]. 北京科技大学, 2023.
- [74]孙腾. 超细晶6061铝合金晶体塑性循环本构建模及低周疲劳裂纹萌生寿命预测[D]. 广西大学, 2022.
- [75]温俊霞. 热冲击条件下钴基合金的组织演化与失效机理[D]. 兰州理工大学, 2020.

- [76]SVIRID A E, PUSHIN V G, KURANOVA N N, et al. Structural and Phase Transformations and Physical and Mechanical Properties of Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys Subjected to Severe Plastic Deformation and Annealing[J]. Materials, 2021,14(16): 4394.
- [77]邵卓平. 植物材料(木、竹)断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [78]HASSAN-BEYGI, S. R, AGHBASHLO, et al. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia L.*) during convection drying[J]. International Agrophysics, 2009,23(2).
- [79]MEDEIROS G L, SERENO A M. Physical and transport properties of peas during warm air drying[J]. Journal of Food Engineering, 1994(3): 355-363.
- [80]BHAGWATI P, GOKHAN B, ZHONGLI P. Moisture Diffusivity in Rice Components During Absorption and Desorption[J]. Drying Technology, 2011,29(8).
- [81]M. K, A. M, A. S, et al. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts[J]. Journal of Food Engineering, 2005,78(1).
- [82]AYHAN D. Fuel and Combustion Properties of Bio-wastes[J]. Energy Sources, 2005,27(5).
- [83]OpenMMLab[EB/OL].[2023-04-02]. <https://openmmlab.com/>.
- [84]史高峰, 李小勇. SSD数据结构与算法综述[J]. 微型电脑应用, 2012,28(04): 56-61.
- [85]刘婷, 罗佩琪, 范云生. 基于SSD的海面小目标检测综述[J]. 大连海事大学学报, 2022,48(04): 65-75.
- [86]BASTIAN L, JIRI M, NICU S, et al. Computer Vision – ECCV 2016[M]. Springer, Cham, 2016.
- [87]李伟朝, 陈志豪, 张勰, 等. 基于PU-Faster R-CNN的手机屏幕缺陷检测算法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023,48(04): 1-18.
- [88]李雪露, 杨永辉, 储茂祥, 等. 基于改进Faster R-CNN的钢板表面缺陷检测[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2023,47(02): 66-73.
- [89]MAYOR L, SERENO A M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2004(3): 373-386.
- [90]ZHANG W, PAN Z, XIAO H, et al. Pulsed vacuum drying (PVD) technology improves drying efficiency and quality of *Poria* cubes[J]. Drying Technology, 2018,36(8).
- [91]KARATHANOS V T, VILLALOBOS G, SARAVACOS G D. Comparison of Two Methods of Estimation of the Effective Moisture Diffusivity from Drying Data[J]. Journal of Food Science, 1990(1): 218-223.
- [92]BERENBLUT I I. The Mathematics of Diffusion[J]. Physics Bulletin, 1956,7(10).
- [93]KHAN M I H, KUMAR C, JOARDER M U H, et al. Determination of appropriate effective diffusivity for different food materials[J]. Drying Technology, 2016,35(3).
- [94]ZHONGLI P, HAMED E, CHANDRASEKAR V, et al. Infrared Research and Development

Improve Food Healthfulness, Quality, and Safety While Saving Energy and Water in Food Processing[J]. Journal of food science, 2019,84(7).

- [95]陈朝银,赵声兰,马雅鸽,等.核桃初加工工艺设备现状研究[J].包装与食品机械,2021(02): 45-51.
- [96]梁勤安,杨军.核桃初加工工艺及关键设备[J].农机化研究,2003(01): 154-156.
- [97]耿阳阳,侯娜,何佳丽,等.梯度干燥温度对核桃感官品质的影响[J].食品科技,2018(02): 64-69.
- [98]李忠新,刘奎,杨莉玲,等.锥篮式核桃破壳装置设计与试验[J].农业机械学报,2012(S1): 146-152.
- [99]刘美娟,吴本刚,潘忠礼,等.不同干燥技术下胡萝卜丁的干燥特性及品质研究[J].食品工业,2018(01): 158-163.
- [100]食品安全国家标准 食品中水分的测定[S].中华人民共和国卫生部.
- [101]赵超.山核桃破壳力学分析[J].西南大学学报(自然科学版),2012(09): 123-127.
- [102]The effect of ultrasound pre - treatment on quality, drying, and thermodynamic attributes of almond kernel under convective dryer using ANNs and ANFIS network[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020,43(1).
- [103]Physical properties of plant and animal materials: Mohsenin, N. N. Vol. I Part I: Structure, physical characteristics and rheological properties Part II: Texture of foods, mechanical damage, aero- and hydrodynamic characteristics and frictional properties Department of Agricultural Engineering, The Pennsylvania State University, March, 1968[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1968,13(4).
- [104]SHI J, PAN Z, MCHUGH T H, et al. Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating[J]. LWT - Food Science and Technology, 2008(10): 1962-1972.
- [105]SINGH B, GUPTA A K. Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes[J]. Journal of Food Engineering, 2006,79(2).
- [106]SRIKIATDEN J, ROBERTS J S. Measuring moisture diffusivity of potato and carrot (core and cortex) during convective hot air and isothermal drying[J]. Journal of Food Engineering, 2005,74(1).
- [107]于海明,李海源,张欣悦,等.水稻秸秆营养穴盘微波热风耦合干燥动力学模型研究[J].农业机械学报,2020(05): 339-348.
- [108]于镇伟,陈坤杰,高崎,等.有机污泥干燥特性与干燥模型研究[J].农业机械学报,2017(10): 286-291.
- [109]王凤贺,丁治春,陈鹏泉,等.油茶籽热风干燥动力学研究[J].农业机械学报,2018(S1): 426-

432.

- [110] LIU X, QIU Z, WANG L, et al. Mathematical modeling for thin layer vacuum belt drying of Panax notoginseng extract[J]. Energy Conversion and Management, 2008,50(4).
- [111] LI C, LIAO J, YIN Y, et al. Kinetic analysis on the microwave drying of different forms of water in lignite[J]. Fuel Processing Technology, 2018(3): 174-181.
- [112] 王汉羊, 刘丹, 于海明. 山药微波热风耦合干燥特性及动力学模型[J]. 食品科学, 2018(15): 115-121.
- [113] KESBI O M, SADEGHI M, MIREEI S A. Quality assessment and modeling of microwave-convective drying of lemon slices[J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2016(3): 216-223.
- [114] JAFARI H, KALANTARI D, AZADBAKHT M. Semi-industrial continuous band microwave dryer for energy and exergy analyses, mathematical modeling of paddy drying and it's qualitative study[J]. Energy, 2017(3): 1016-1029.
- [115] YALDÝZ O, ERTEKÝN C. THIN LAYER SOLAR DRYING OF SOME VEGETABLES[J]. Drying Technology, 2001(3): 583-597.
- [116] 徐建国, 张森旺, 徐刚, 等. 莲子薄层热风干燥特性与水分变化规律[J]. 农业工程学报, 2016(13): 303-309.
- [117] WALODDI W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability[J]. J. Appl. Mech, 1951,18(3).
- [118] 范范佐. 生物多孔介质热风干燥跨尺度传热传质数值模拟研究[D]. 北京石油化工学院, 2022.
- [119] MALCATA F X. Food Process Engineering:Basics and Mechanical Operations[M].CRC Press, 2023.
- [120] MUJUMDAR A S. Handbook of Industrial Drying:Second Edition, Revised and Expanded[M]. CRC Press, 2020.
- [121] PANKAEW P, JANJAI S, NILNONT W, et al. Moisture desorption isotherm, diffusivity and finite element simulation of drying of macadamia nut (*Macadamia integrifolia*)[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016,100.
- [122] 刁卓超. 澳洲坚果干燥特性及力学特性研究[D]. 昆明理工大学, 2011.
- [123] AREGBESOLA O A, OGUNSINA B S, SOFOLAHAN A E, et al. Mathematical modeling of thin layer drying characteristics of dika (*Irvingia gabonensis*) nuts and kernels[J]. Nigerian Food Journal, 2015,33(1).