文章编号:1674-2869(2025)02-0218-06

青砖茶模内蒸制工艺负载特性分析

滕 靖[1,2],郑鹏程*[1],刘盼盼[1]
1. 湖北省农业科学院果树茶叶研究所,湖北 武汉 430064;
2. 数字制造湖北省重点实验室(武汉理工大学),湖北 武汉 430070

摘 要:为进一步优化青砖茶模内蒸制工艺的参数,通过试验数据拟合压制过程中的等效负载,结合AMESim和MATLAB软件平台搭建青砖茶压制联合仿真模型。仿真结果表明:高品质青砖茶的压制时间为5.5 s,比空载过程增加了1.5 s,单运行周期为116.8 s;采用无限位柱结构的模具,以单次单片、双片、三片和四片模式生产成品砖的厚度最大为11.0 mm,最小为10.6 mm,通过降低泵转速至工频值的40%,将成品砖的厚度偏差控制在0.2 mm,而压制过程增加0.5 s;高品质青砖茶压制过程主缸最大压力达到19.5 MPa,且压降比老青砖更快。压制试验结果表明:青砖茶成品砖初次压制后的厚度与仿真结果一致,产能略低于理论值。该仿真模型计算速度快,参数修改方便,有效缩短了青砖茶模具的开发周期,为建立青砖茶专家生产系统奠定了理论基础。

关键词:青砖茶;模内蒸制;负载特性;液压机;液压系统
中图分类号:TG315.4 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202404025

Loading characteristics of in-mould steaming process for dark-green brick tea

TENG Jing[1,2], *ZHENG Pengcheng*[*1], *LIU Panpan*[1]
1. Fruit and Tea Research Institute of Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China;
2. Key Laboratory of Digital Manufacturing in Hubei Province(Wuhan University of Technology), Wuhan 430070, China

Abstract: To further optimize the parameters of the in-mould steaming process for dark-green brick tea, we fit the equivalent load in the suppression process using experimental data and established a model based on the AMESim and MATLAB software platforms. The simulation results indicated that the pressing process of high-quality dark-green brick tea takes 5.5 s, an increase of 1.5 s compared to the unloaded process, with a single cycle time of 116.8 s; in a mould with a structure of infinite number of columns, the maximum and minimum thickness of the finished tea bricks produced in single, double, triple, and quadruple pieces modes is 11.0 and 10.6 mm, respectively. By reducing the pump speed to 40% of the power frequency, the thickness deviation can be controlled within 0.2 mm, while the pressing process increases by 0.5 s. The maximum pressure during the pressing process of high-quality dark-green brick tea reaches 19.5 MPa, and the its pressure drop is faster than that of the old dark-green brick tea. Experimental verification showed that the thickness of the finished dark-green tea bricks is consistent with the simulation results, and the production capacity is slightly lower than the theoretical value. This fast simulation model with easily modifiable parameters effectively shortens the development cycle of the dark-green brick mould and lays a theoretical foundation for the establishment of a dark-green brick tea expert production system.

Keywords: dark-green brick tea; in-mould steaming; loading characteristics; hydraulic press; hydraulic system

收稿日期:2024-04-17
基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-19);国家重点研发计划(2021YFD1601103)
作者简介:滕 靖,博士研究生。Email:jobbase@163.com
***通信作者**:郑鹏程,博士,研究员。Email:ZPC_0362@163.com
引文格式:滕靖,郑鹏程,刘盼盼. 青砖茶模内蒸制工艺下负载特性分析[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(2):218-223.

青砖茶属黑茶类，是中国传统边销砖茶之一，属于健康饮品，逐渐受到消费者青睐。压制是青砖茶周正外形形成的关键工序，传统的压制工艺主要由蒸制茶坯、液压压制、保压定型等工序组成。在传统工艺中茶坯蒸制后含水率、液压机的压力、保压定型时间等主要参数均依赖于制茶工人的经验，难以确保砖茶外形品质的稳定性，砖茶压制工艺标准化推行困难[1-3]。

模内蒸制工艺是基于青砖茶生产过程集成化、自动化、清洁化技术要求开发的全新工艺，将传统生产工艺中茶坯蒸制、压制成型工序集中在成型模具内完成，是青砖茶提档升级的重要工艺创新。相较于传统的制茶方式，减少了蒸茶炉设备投入，同时杜绝了二次污染，且蒸制效果均匀一致、产品转换方便[4]。该工艺下，单模单片模具生产的成品茶砖厚度虽可通过更改液压机相关参数进行控制，但不同的茶坯原料不能混线生产，而一模多片的模具采用限位柱结构虽能够保证成品砖的外形尺寸，但无法实现形状相同而质量不同的产品共线生产，同时也浪费了一定的装机容量，精确表述青砖茶压制过程成为行业推行标准化生产亟待解决的关键问题。文献[5]借助岩土力学中的徐变效应建立了无底直通模具压力-保压时间-回弹量之间的经验公式，仅对青砖茶压制过程进行了定性描述，且不适用于模内蒸制工艺下压制过程分析；文献[6-7]测试模内蒸制工艺下成型压力峰值，探索成型压力对青砖茶品质的影响，但是青砖茶的成型过程依然未描述清楚。

本研究提出了模内蒸制工艺下的青砖茶压制过程负载等效方法，采集实验过程中行程和压力的对应数据用于拟合压制过程的等效负载，利用AMESim和MATLAB软件平台模拟压制成型过程，解析新工艺下液压机的行为特征，为青砖茶生产工艺标准化提供技术支持[8]。

1　青砖茶压制

1.1　工艺流程

茶坯原料经过粗制、精制后，蒸制一定时间，然后施加压力使其具有并保持一定的形状，此过程组成了青砖茶模内蒸制工艺下的压制成型环节。图1为模内蒸制工艺下的压制成型流程，包含上料、蒸制、压制、保压、退模5个工序，茶坯原料通过称量后，经机械手投料至模具中，启动蒸制装置使蒸汽从上而下流通进行蒸制，完成蒸制后，液压机开始压制作业，达到预定尺寸后启动保压程序，保压完成后，脱模取料。图1中，m_0为料仓最低质量，m_1为单砖质量，H_0为最低水位，t_0为蒸制时间，t_1为蒸制计时，t_2为保压时间，t_3为保压计时。

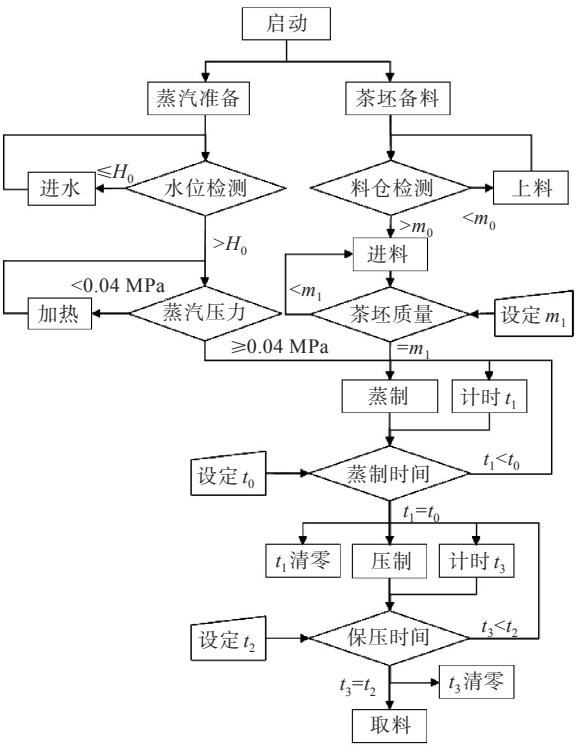

图1　压制成型流程

Fig. 1　Compression molding process

1.2　设备构成

砖茶压制成型工艺由称量、成型和转运设备共同完成，称量设备主要由上料机、称量装置和分料器构成；成型设备为紧压茶制造过程中的关键设备，主要包含蒸汽发生器1、蒸制装置2、成型模具3和液压机4，如图2所示；转运设备主要包括皮带线、真空输送机和机械手。

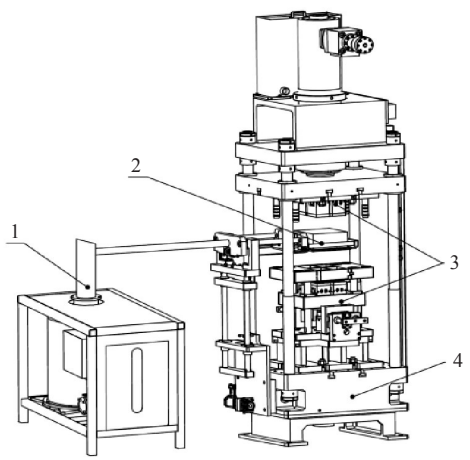

图2　成型设备构成示意图

Fig. 2　Composition of forming equipment

蒸汽发生器采用电加热方式，出口压力0.04 MPa，

整机功率9 kW,蒸汽最大开口直径30 mm。

液压机采用三梁四柱结构,含有2个执行油缸,即主缸和副缸,行程分别为600和350 mm。液压机主缸运行模式分为快进、工进、保压和回退。副缸运行模式分为伸出和缩回,其运行速度通过双向节流阀调节。主缸和副缸均配置位置开关节点及位移检测传感器。

模具采用定框动模结构,分为上模组件和下模组件两部分,分别与压力机活动横梁和下横梁固定安装。下模组件为导柱框架结构,其中置有活动台板,成型模板固定在活动台板上,活动台板上安装型号为KTF200的位移传感器,检测精度0.05%。模具外框尺寸为116 mm×87 mm,两行两列布置于上台板,一次成型4片[8]。针对外框尺寸相同的产品,只需更换不同的模板即可投入生产,模板采用7°防滑块固定,在保证精度的前提下无需拆装模具便可更换,模板与活动台板之间设置有厚度为5 mm的玻璃纤维板。

2 液压系统

2.1 液压系统原理

油压动力单元由液压泵和三相马达构成,进油端、回油端和充液罐连接端均设置有过滤器,液压泵出口处设置单向阀。选用电磁比例阀调节系统压力,油压检测元件为红旗压力变送器,型号HQ500,油路原理图如图3所示。

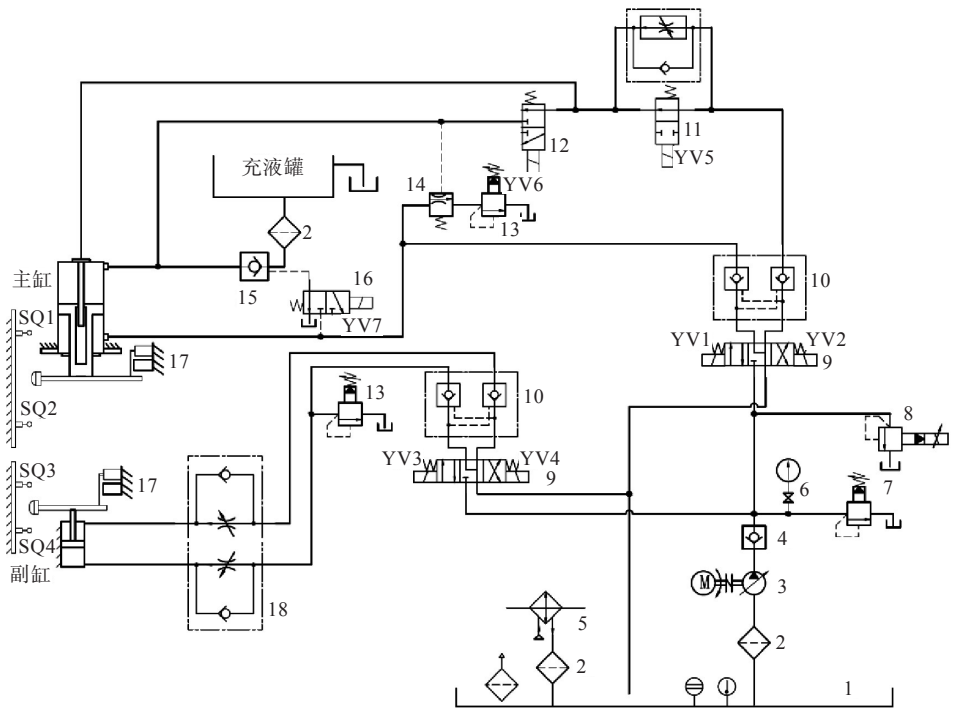

图3 油路原理图

Fig. 3 Oil circuit schematic diagram

液压油经滤油器、油泵、单向阀进入主管路,主管路设置压力表6、比例溢流阀8,并将油路分为主缸油路和副缸油路。主缸无杆侧油口对应油路设置工进电磁阀12和充液阀15,有杆侧油路设置顺序阀14和溢流阀13,主缸的快进油口经电磁节流阀11与电磁阀9连接。副缸油路设置双向节流阀18,无杆侧油口对应设置溢流阀13。 比例溢流阀8压力设定25 MPa,液压机公称力630 kN,柱塞泵额定转速为1 500 r/min,配装电机转速1 460 r/min,柱塞泵型号为25YCY,主缸选用活塞直径180 mm(杆直径160 mm)带快速功能双作用柱塞缸,副缸选用直径125 mm的双作用柱塞缸[10-11]。

2.2 压制过程

与模内蒸制工艺相适应的控制流程:启动压力机3 s,副缸升起(0~160 mm),送料匀料20 s,副缸降落(160~150 mm),蒸制15 s,副缸升起(150~160 mm),气垫动作3 s,副缸降落(160~152 mm),主缸快速下行(0~350 mm),主缸停滞1 s,工进(350~409 mm),保压50 s,卸荷,主缸上行(409~330 mm),副缸升起(152~165 mm),气垫动作3 s,副缸回程(165~0 mm),主缸工进下行(330~430 mm),主缸回程(430~0 mm)。

2.3　负　载

初始装填茶坯厚度90 mm，蒸制后茶坯厚度为60 mm，成品砖厚度为11 mm，主缸活塞在行程350~409 mm区间完成砖茶压制，采用上模板安装高温应变片方式测量压制过程中茶坯所受作用力，作用力测试试验数据如表1所示。

表1　作用力测试记录

Tab. 1　Force test records

行程 / mm	360	380	385	390	395	400	405	409
作用力 / kN	0.0	2.2	5.6	14.4	35.2	90.1	230.5	483.3

主缸行程在360 mm时接触茶坯，茶坯受力随主缸行程增大而增大。通过拟合典型值建立连续的作用力与主缸行程的关系，x表示主缸实时位置，$F(x)$表示实时作用力：

$$F(x)=3.929\times10^{-5}\times(x-360)^5-4.5\times10^{-3}\times(x-360)^4+1.915\times10^{-1}\times(x-360)^3-3.626\times(x-360)^2+25.4\times(x-360)\quad(1)$$

茶坯压制完成后需经过保压周期T进行保压处理，之后砖茶外形尺寸被视为定形而不再变化。在保压阶段，茶坯应力随时间t增长而逐渐变小，将初始的茶坯反作用力视作“1”，通过测试反作用力与时间的试验数据，拟合得到实时茶坯反作用力系数$g(t)$：

$$g(t)=\frac{1}{4^{t/T}}\quad(2)$$

综合式(1)和式(2)可得压制过程中等效负载：

$$F(x,t)=F(x)\cdot g(t)\quad(3)$$

3　仿真及试验

3.1　模型建立

在AMESim和MATLAB软件平台下建立液压系统联合仿真模型，通过SimulinkCosim接口进行数据通信[12]。青砖茶液压系统AMESim模型和Simulink控制模型分别如图4和图5所示[13-15]。其中，p_1、p_2分别表示主缸无杆侧油路压力和供油泵组出油口压力，q_{V1}、q_{V2}分别表示主缸无杆侧油路体积流量和供油泵组出油口体积流量，v_1、v_2分别表示主缸活塞缸和副缸活塞缸的运行速度，S表示具有一定压力的液压油供给端，X_1、X_2、…、X_8和Y_1、Y_2、…、Y_8表示用于AMESim模型和Simulink模型互相交换数据的变量。

图5中，采用子系统封装Stateflow模块仿真液压机自动压制过程，其中，H_1、H_2分别表示计时器启动和负载启动时液压缸对应行程值。

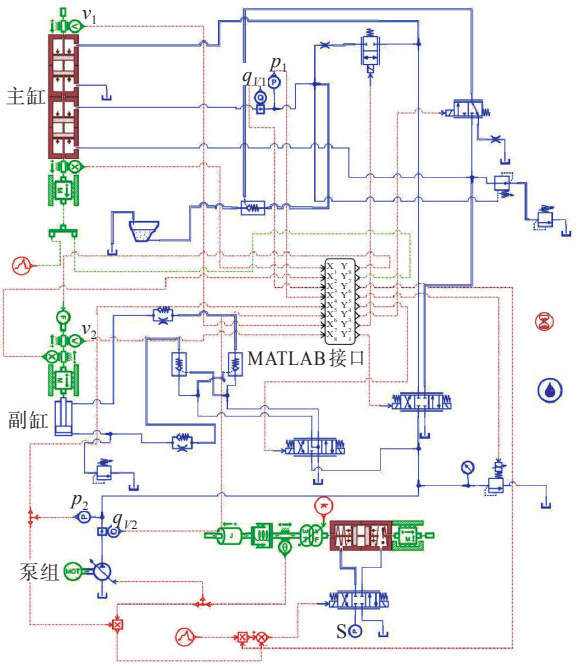

图4　液压系统AMESim模型

Fig. 4　AMESim model of hydraulic system

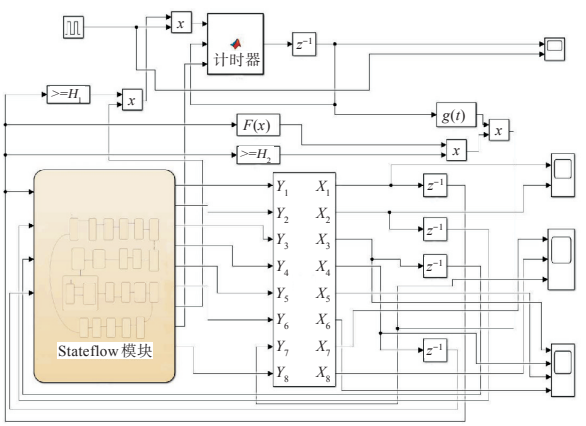

图5　Simulink控制模型

Fig. 5　Control model by Simulink

3.2　模型参数

茶砖成品长116 mm，宽87 mm，厚度11 mm，液压机活动横梁质量为345 kg，模具的上模组件质量为116 kg，液压机主缸缸径180 mm，活塞杆直径160 mm，小杆杆径40 mm，副缸缸径125 mm，活塞杆直径85 mm。

3.3　运行分析

依据液压机在未装载原料(空载)和装载原料(负载)两种模式下分别运行仿真模型，运算结果如图6所示。在空载模式下，主缸运行速度为快下115 mm/s，工进62 mm/s，回程速度94 mm/s，压制时间4.0 s，单运行周期115.3 s。在负载模式下，主缸工进时的运行速度随负载的增加而减慢，压制时间5.5 s，在52.1 s时，青砖茶产品厚度达到

11 mm，单运行周期116.8 s。

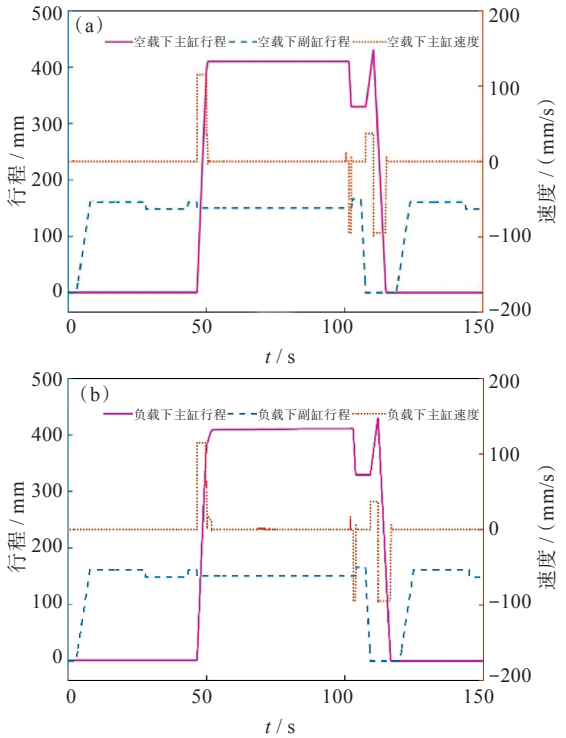

图6 空载模式(a)和负载模式(b)下主副缸位移及主缸运行速度

Fig. 6 Displacements of each hydro-cylinder and main hydro-cylinder velocity under non-loaded mode (a) and loaded mode (b)

图7为不同装载模式下液压机运行情况及负载变化，对比一模单片、双片、三片、四片模式的压制过程，最大单运行周期为116.8 s，最小值为115.8 s，一模四片模式的压制周期较一模单片模式增加了0.8 s。负载在52.1 s时达到最大4.95×10^5 N，主缸压力为19.5 MPa。液压泵组在工频50 Hz运行下，一模单片模式的成品砖厚度为10.6 mm，一模四片模式的成品砖厚度为11.0 mm，最大偏差0.4 mm，烘干后的成品砖无法正常进行包装作业。通过修改马达泵组运行频率至20 Hz，控制成品砖厚度偏差值在0.2 mm以内，压制时间相较工频50 Hz时增加了0.5 s。结果表明：在模内蒸制工艺下形状相同而质量不同的产品进行混线生产的技术方案是可行的。

茶坯原料分为以三、四叶为主的高品质青砖茶和传统的老青砖茶，其保压时间分别为50.0和75.0 s，两种茶坯原料压制过程中的液压机运行情况如图8(a)所示，单运行周期分别为116.8和144.8 s，其压制成型过程的等效负载图及主缸压力变化如图8(b)所示，单个周期内运行至52.1 s时负载达到最大值(4.95×10^5 N)，压制老青砖时主缸

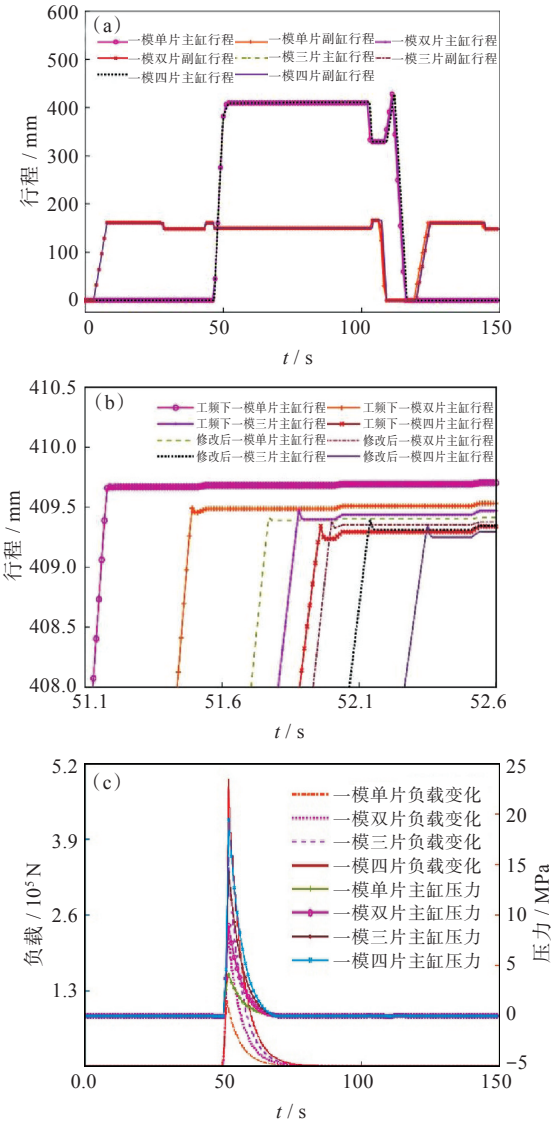

图7 不同装载模式下液压机运行情况及负载变化：(a)液压缸位移图，(b)频率修改前后主缸压制行程，(c)不同装载模式下的负载和主缸压力

Fig. 7 Performance of hydraulic press and loads variation under different loading modes: (a) displacements of each hydro-cylinder, (b) displacements of main hydro-cylinder before and after frequency modification, (c) equivalent loads and main hydro-cylinder pressure under different loading modes

压力下降较慢，最大值为19.5 MPa。

3.4 压制试验

压力设备为公称力630 kN的三梁四柱液压机，模具采用未安装限位柱的定框动模结构形式，单次最大产能为4片，产品规格与仿真模型一致。原料为中茶108，经传统发酵工艺后复制，蒸汽压力为0.04 MPa，蒸汽温度112 ℃，车间环境温度21 ℃，砖茶成品采用一模双片模式压制，马达频率50 Hz，初压后的茶砖厚度为10.7 mm，将马达频率降至20 Hz，初压后的茶砖厚度10.9 mm，与0.2 mm的

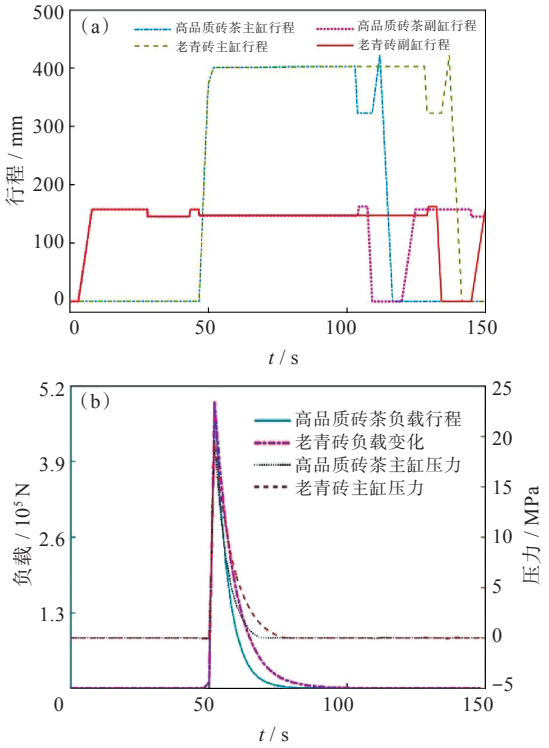

图8　采用不同茶坯原料时液压机运行情况及负载变化：(a)油缸位移图，(b)负载变化和主缸压力图

Fig. 8　Performance and loads variation of hydraulic press under adopting different raw materials: (a) displacements of each hydro-cylinder, (b) loads variation and main hydro-cylinder pressure

误差范围相一致，砖茶成品采用一模四片模式压制后砖茶厚度与成品砖厚度一致，3.5 h共计产出福寿饼396片，低于理论值430片，分析原因为生产过程中，由于称量一次成功率不同，存在供料等待情况，一定程度地降低了产能。

4　结　论

在AMESim和MATLAB软件平台上建立联合仿真模型，对青砖茶模内蒸制工艺下的压制成型过程进行模拟仿真，组建了压制成型设备并开展相关试验。主要得出以下结论：

(1)青砖茶模内蒸制工艺下的压制成型负载等效方法是可行的，本研究所建立的联合仿真模型计算速度较快，且设置简便，可作为开发定制化、个性化产品的辅助手段，为青砖茶模具设计提供了理论指导；

(2)液压机在一模四片典型负载下运行特征参数表明该压制过程中设备未达到最大允用负载，在横梁台面尺寸允许的情况下，可增加单模产品数量，从而最大程度地利用设备的负载容量，降低产品生产成本，为量产提供技术支持；

(3)通过控制技术实现了不同原料、不同规格的紧压茶产品共线生产，为进一步开发青砖茶柔性化生产线奠定了基础。

参考文献

[1] 刘盼盼，郑鹏程，龚自明，等.不同品种青砖茶化学成分与抗氧化活性的比较分析[J].现代食品科技，2018，34(9)：77-87.

[2] 陈玉琼，张伟，倪德江，等.青砖茶与绿茶对大鼠脂代谢和抗氧化作用的比较研究[J].营养学报，2010，32(3)：272-275，280.

[3] YANG X H，HUANG M J，QIN C Q，et al.Structural characterization and evaluation of the antioxidant activities of polysaccharides extracted from Qingzhuan brick tea [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2017，101：768-775.

[4] 滕 靖，龚自明，高士伟，等.一种小饼茶自动化压制成型设备及其压制成型工艺过程：201310304897.2[P].2015-05-13.

[5] 徐翔，孙军，徐进，等.青砖茶压制设备的改进与力学分析[C]//现代食品及农产品加工科技创新论文集.北京：中国农业机械学会，2016：138-139.

[6] 滕靖，王红贞.基于模内蒸制的青砖茶成型工艺试验及优化[J].武汉工程大学学报，2019，41(2)：202-204.

[7] 王胜鹏，滕靖，郑鹏程，等.青砖茶压制压力优化及GCG近红外快速检测模型建立[J].农业工程学报，2020，36(8)：271-277.

[8] 刘昕晖，陈晋市.AMESim仿真技术在液压系统设计分析中的应用[J].液压与气动，2015(11)：1-6.

[9] 滕靖，龚自明，郑鹏程，等.一种茶叶压制装置及压制成型工艺：201611263205.4[P].2019-09-17.

[10] 卢光贤，王立伦.机床液压传动与控制[M].西安：西北工业大学出版社，1999：153-169.

[11] 许贤良，韦文术.液压缸及其设计[M].北京：国防工业出版社，2011：146-175.

[12] 翁敏学，周俊静，殷晨波，等.基于AMESim与Simulink的液压挖掘机控制策略研究[J].中国农机化学报，2016，37(6)：54-57.

[13] XU M，NI J，CHEN G J. Dynamic simulation of variable-speed valve-controlled-motor drive system with a power-assisted device [J]. Journal of Mechanical Engineering，2014，60(9)：581-591.

[14] 方晓瑜，赵宏强，文国臣.基于AMESim恒功率变量泵的仿真研究[J].工程设计学报，2011，18(6)：437-443.

[15] 赵新，倪向东，鲍明喜，等.基于AMESim-Simulink的新型采棉机采摘与行驶恒转速协同控制[J].液压与气动，2020(5)：46-51.

本文编辑：霍淑利