

基于有限元的秸秆压块环模成型温度场分布

汤明明¹, 陈树人^{1,2}, 肖君¹, 蒋成宠¹

(1.江苏大学农业装备工程学院, 镇江212013; 2.江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江212013)

摘要：目前环模压块成型机的环模块温度差过高，成型后受热不均。结合压块成型工作条件，利用ANSYS中的Thermal模块，模拟环模中压块成型温度场，分析环模压块在不同时刻的温度场分布，并对成型装置进行优化设计。结果表明，优化后整体温度趋于平衡，温差明显减小，在加热20min后，环模块的温度差降为19.25℃。优化后环模块成型过程的温度场沿轴向呈先增大，再波动状平稳，最后逐渐减小的趋势，环模块大部分区域的温度变化趋于缓和，环模块成型温度更均匀。

0引言

秸秆压缩成型技术是将秸秆废弃物等用机械加压的方法，使原来松散、无定形的原料压缩成具有一定形状、密度较大的固体成型燃料，秸秆在经过压缩成型之后，密度、强度都有了质的改善，不但利于储藏和运输，在使用上也大大提高了生物质作为燃料的品质和性能，可以为日常生活、工业生产提供高效清洁的能源。我国作为农业大国，秸秆资源非常丰富，农作物秸秆的总量约有7亿t，但对于如此巨大的宝贵资源利用率却不足30%，据统计，每年的秸秆资源如果可进行充分利用，相当于3.1亿t标准煤[1-3]。

生产中，为了使前次成型后滞留在环模块内的压块顺利挤出，使得设备能够安全启动，立式环模压块成型机需要在启动前对设备进行一段时间的成型。实际上，当前成型所用的电热丝配置非常粗糙，其中主要是位置的配置，不仅达不到高效率的成型效果，而且造成环模块在成型过程后温度分布很不均匀，从而影响了压块的成型质量和设备的使用寿命[4]。借助于大型有限元分析软件ANSYS中的Thermal模块，模拟环模的温度场，可以直观分析环模的温度场分布，并且运用软件中的优化模块，可以对其中电热丝的位置配置进行较好优化设计[5]。

1环模块成型温度场仿真

1.1模型建立

立式环模成型机在正式启动生产之前，需要先对设备进行成型，其中主要是对压块成型的关键部件环模块进行加热升温，目的是将前次生产结束时滞留在环模块内硬化的秸秆压块进行软化，以便顺利挤出，防止堵塞环模孔而使设备发生剧烈振动，同时也为秸秆压块的成型提供适宜的温度[6]。当前立式环模压块成型机中的加热装置，采用的是4根环形电热丝分别嵌于上压板、下压板与环模块交界处。

由于设备中使用的是组合式环模块，环模块的数量为60块。考虑到几何的对称性，为简化模型，避免整体建模的大量计算，现采用1/60的环模组，即1块环模块配合与其相接触上压板、下压板和电热丝进行三维建模。当前在实际生产中主要使用2种孔型的环模块，即方孔和圆孔，2种孔型对于温度场的分析和电热丝位置优化配置的方法相同，因此主要对圆形孔环模块的成型温度场分析和优化研究进行了论述。根据对实际零件测绘所得的参数，首先在SolidWorks软件中建立模型，如图1所示，并将其转换成x_t格式后，导入到ANSYS软件中进行成型温度场的分析[7]。

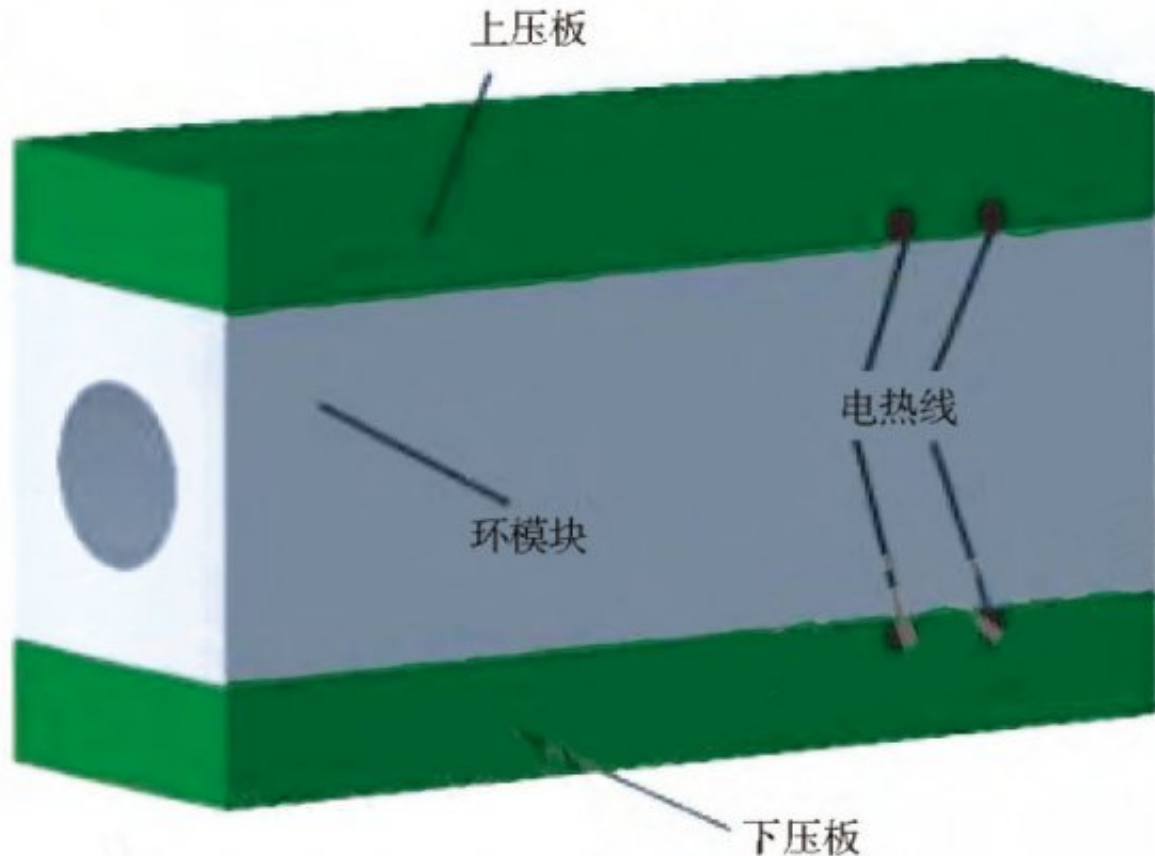


图 1 环模块三维模型

Fig. 1 Three dimensional model of ring module

1.2 参数确定

仿真前，首先对环模块传热模型的简化作以下基本假设。

- (1) 周围环境温度为室温20℃，且保持恒定。
- (2) 电热丝产生的热量全部传递给环模块。
- (3) 环模块表面与周围空气以热对流方式进行热量交换。
- (4) 不考虑传热过程中的辐射散热。
- (5) 边界条件不随温度的变化而变化。

根据以上环模块传热过程的基本假设，分别在上压板、下压板的表面以及环模块的侧面设定对流边界条件(第3类边界条件)，同时由于电热丝在环模块加热过程中起着热源的作用，故对环模块的4根电热丝施加热生成率体载荷(第2类边界条件)。根据热生成率的定义，将其作为体载荷施加于单元上，在单元内进行热生成的模拟。忽略电热丝加热的热损耗，根据电热丝中通过的电流、电阻以及模型中电热丝的体积，可对所要施加的热载荷进行计算，热流率和热生成率分别如式(1)、式(2)所示：

$$HF = Q/t = I^2 R = 124 \text{ W} \quad (1)$$

$$HG = HF/V = HF/\pi F^2 L = 3.16 \times 10^7 \text{ W/m}^3 \quad (2)$$

式中 HF ——热流率, W

HG ——热生成率, W/m^3

I ——电热丝中通过的电流, A

R ——电阻, Ω

V ——电热丝的体积, m^3

对导入ANSYS的模型首

先进行材料属性的设置。环模块的材料为40Cr, 取

密度为 8450kg/m^3 , 弹性模量为 2.08×10^{11}

Pa, 泊松比为0.31, 比

热容为 $459.8\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 导热系数为 $62\text{W}/(\text{m}$

$\cdot \text{K})$, 热膨胀系数为 1.9×10^{-5}

, 并设置环模块与空气的自然对流换热系数为 $9.23\text{W}/(\text{m}^2$

$\cdot \text{K})$, 环模块初始温度和周围空气温度为 20°C 。上压板和下压板的材料为Q235, 比热容为 $310\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 导热系数为 $38\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ [8-10]。根据式(1)和(2)得出, 在环模块中的每根电热丝施加热载荷, 即热生成率为 $3.16 \times 10^7\text{W/m}^3$ 。

选用solid70作为有限元热分析的单元。整体结构采用自由网格, 在达到所需精度前提下为减少计算量, 设定网格划分的尺寸为 3×10^{-3}

m。同时为准确分析环模块工作前电热丝成型的温度场状态, 设定仿真时间 $\text{TIME}=1800\text{s}$, 即在30min内环模块在电热丝加热下所形成的温度场[11-

12]。分别对4根电热丝加载体载荷—热产生率 $\text{HG}=3.16 \times 10^7\text{W/m}^3$

, 通过ANSYS中的分选功能选中环模块的外表面, 施加热对流载荷, 并将环境温度设定为 20°C , 在检查无误后开始对温度场进行分析。

2结果分析

计算完成后, 通过ANSYS软件中的后处理模块对仿真数据进行处理和分析, 分别提取成型5、10、20和30min的环模块温度场云图, 如图2所示。在电热丝加热20min后, 环模块的温度可达到最低温度 84°C , 最高温度 129°C , 此时的温度已基本符合实际生产的起始温度要求, 可启动设备进行工作, 仿真的结果与实际设备成型情况相符合。

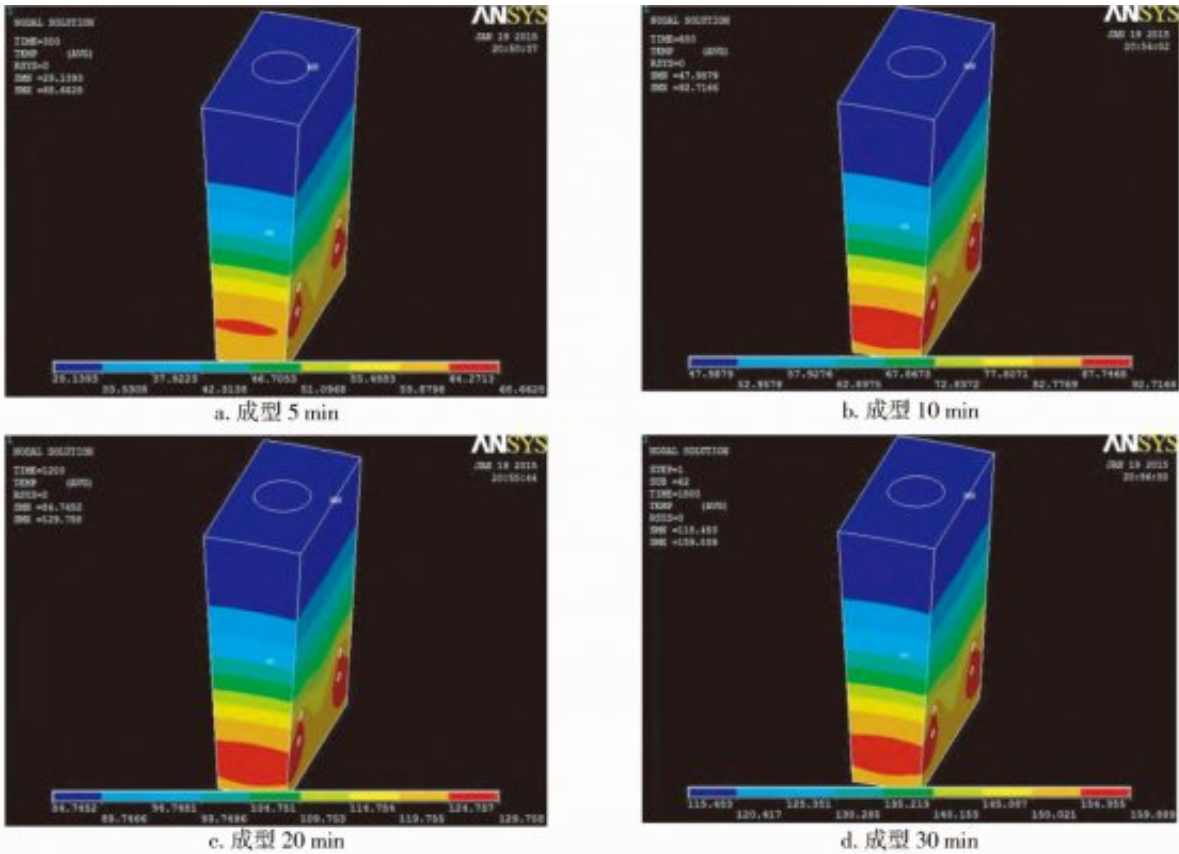


图2 成型温度场分布

Fig. 2 Molding temperature field distribution

以图2中a - d4个不同的时间段为代表，可以看出有环模块在成型过程中的温度差都较大，其中最高温度基本出现在电热丝附近的环模块入口处，最低温度靠近环模块的出口位置。在环模块靠近入口处的侧端出现了较大区域的红色，可知在环模块的侧端沿着电热丝的轴向存在着成型高温区，并且从成型时间上看，升温速度较其他区域快很多，从而使得整体受热很不均匀。由于环模块出口温度较低，环模压块机在成型结束后进行正常工作时，经常因为前次挤压结束后，残留于环模块内的秸秆压块未能达到有效挤压温度而阻塞出口，从而影响生产效率，有必要对环模块成型的温度场进行优化设计，而对于温度场的优化设计归根结底是对环模块内的电热丝位置的优化配置。

沿轴向路径的温度变化曲线，如图3所示，环模块在成型过程中，其轴向温度的分布很不均匀，且各个地方的温差都较大。分布曲线呈现较大波动且沿轴向不断增大，随后略微有减小的趋势，表明环模块沿轴向热传导的异向性，从而容易产生较大的附加热应力而影响环模块的使用寿命。并且不均匀的环模温度场直接影响秸秆压块的成型，使得在压块成型过程中由于各部位的受热不均匀而导致疏密不均、开裂，甚至无法成型的现象。

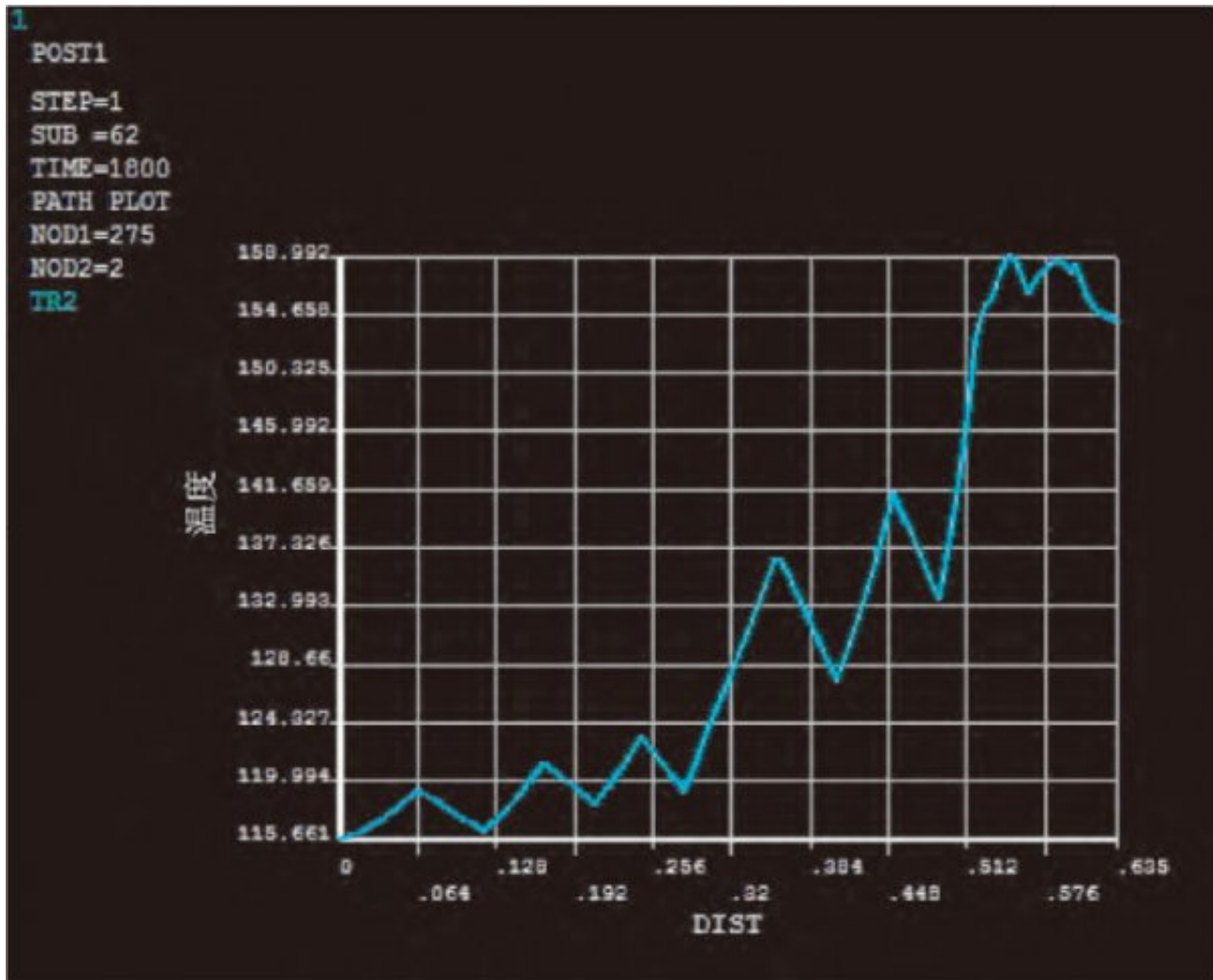


图3 轴向温度分布

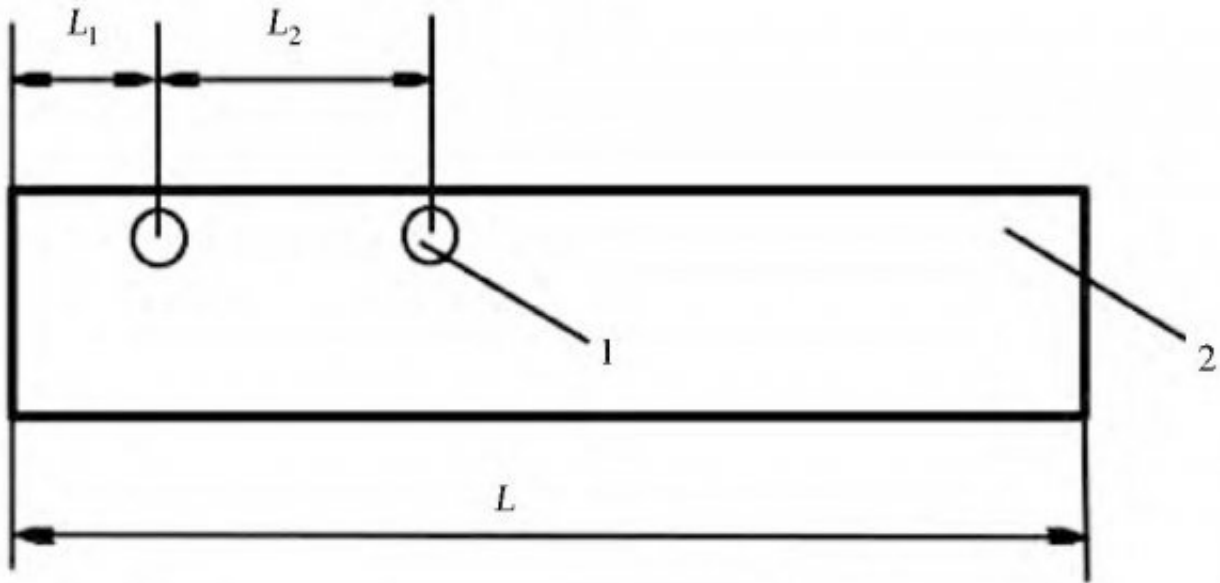
Fig. 3 Axial temperature distribution

3优化设计

3.1变量设置

ANSYS程序提供了零阶和一阶两种优化的方法，可以满足几乎所有优化问题的解决。作为稳定性较高的优化方式，零阶方法更适用于工程问题的解决。而一阶方法需要更多考虑目标函数与设计变量之间的相互关系，从而适用于目标函数明确且优化精确度较高的问题。为了使以上2种优化方法更加完善，在ANSYS软件中设计了对问题进行解析、估算和校正的循环程序，即分析起始优化条件，估算优化需求的可行性以及对于优化结果进行校正的过程。当达到所有设计要求时，不断执行的循环程序才会停止。

基于传统的优化理论，ANSYS的优化分析对于所要优化的模型首先进行参数化设计，包括设计变量、约束条件以及目标函数。根据ANSYS中对优化模块的规定，设计变量最多可设置60个、状态变量数最多为100个，而目标函数只能为1个。所以在对电热丝位置配置进行优化设计前，首先对于所要优化的物理模型需要进行参数化设计和定义[13]。



1. 电热丝 2. 环模块

图4 环模块电热丝配置

Fig. 4 Configuration of heating wire in circular mold

将现有环模块中的电热丝配置简化，如图4所示，选取图中 L_1 和 L_2 作为优化变量， $L=L_1+L_2$ 作为状态变量，并将 $\delta = T_m - T_n$ 作为优化的目标函数，其中 T_m 为环模块在电热丝加热后所形成温度场的最高温度， T_n 为最低温度。优化设计的主要目的是为了在电热丝成型过程中，提高环模块温度的均匀性，即得到 δ 为最小值的温度场状态。根据环模块的实际测绘尺寸，设计优化的数学模型如下：

$$\left. \begin{aligned} 15 \text{ mm} < L_1 < 77.5 \text{ mm} \\ 20 \text{ mm} < L_2 < 77.5 \text{ mm} \\ 40 \text{ mm} < L = L_1 + L_2 < 155 \text{ mm} \end{aligned} \right\} \rightarrow \min \delta [L_1, L_2]$$

3.2 优化结果分析

根据ANSYS14.0关于环模块的优化结果可得，最佳的优化条件为当 $L_1=43.59\text{mm}$ ， $L_2=47.83\text{mm}$ 时，环模块在电热丝成型30min后，最低温为 141.23 ，最高温为 161.29 ，环模块的整体温度差为 20.06 。利用ANSYS的通用后处理器对结果进行整理和分析，分别得到在电热丝加热5、10、20和30min时环模块的成型温度场分布云图以及相对应的最低温和最高温，如图5所示。

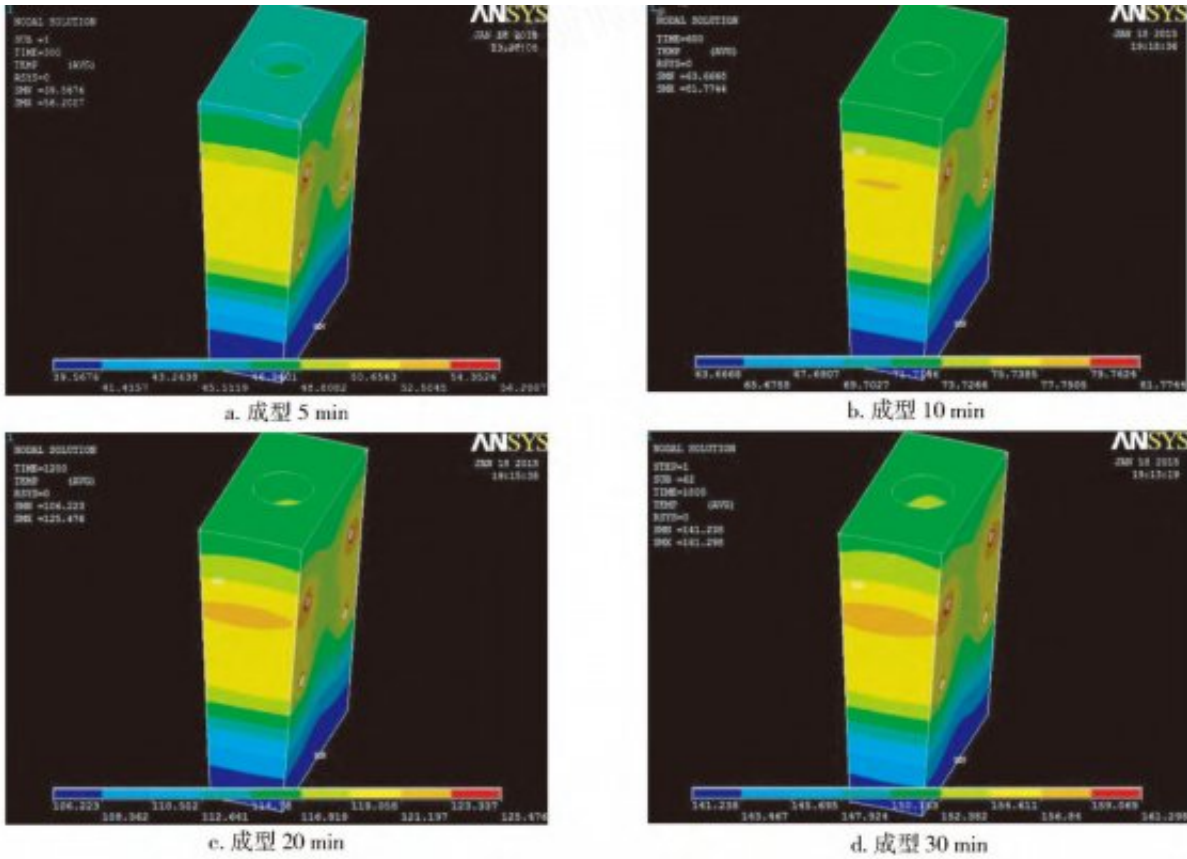


图5 优化后的成型温度场分布

Fig. 5 Optimized molding temperature field distribution

由图5中优化后环模块成型温度场的云图可以看出，在加热的不同时间段，环模块的高温区域明显减少，中温区域相对增加，表明在优化后，环模块的整体温度差趋于平衡，相对先前有明显改善。其中最高温度基本上还是在电热丝附近，最大的高温区还是沿着电热丝的轴向分布，但是区域面积和最高温度值减小。

优化前后成型温度场温差如表1所示，表中温差减少率 $\Phi = (\text{原} - \text{优}) / \text{原}$ 。由表1可知，在所选取的各时刻，对于环模块的温度场分布优化效果显著，对于各个加热时段，环模块整体温差的减小率基本在50%以上，从而较大保证了在成型阶段环模块的均匀受热，同时也减小了热应力的产生。

表1 优化前后成型温度场温差

Tab. 1 Molding temperature before and after optimization

时间 t/min	原环模块温差 $\delta_{\text{原}} / ^\circ\text{C}$	优化后环模块温差 $\delta_{\text{优}} / ^\circ\text{C}$	温差减少率 $\Phi / \%$
5	39.52	16.63	57.92
10	44.73	18.11	59.51
20	45.01	19.25	57.23
30	44.41	20.06	54.83

电热丝成型30min时，优化后环模块轴向温度分布曲线如图6所示。环模块成型过程的温度场沿轴向呈现先增大，再波动状平稳，最后逐渐减小的趋势。对于不同部位的温度差异明显减小，且波动状的平稳阶段较长，表明环模块大部分区域的温度基本趋于缓和，成型温度的均匀性明显得到了提高。

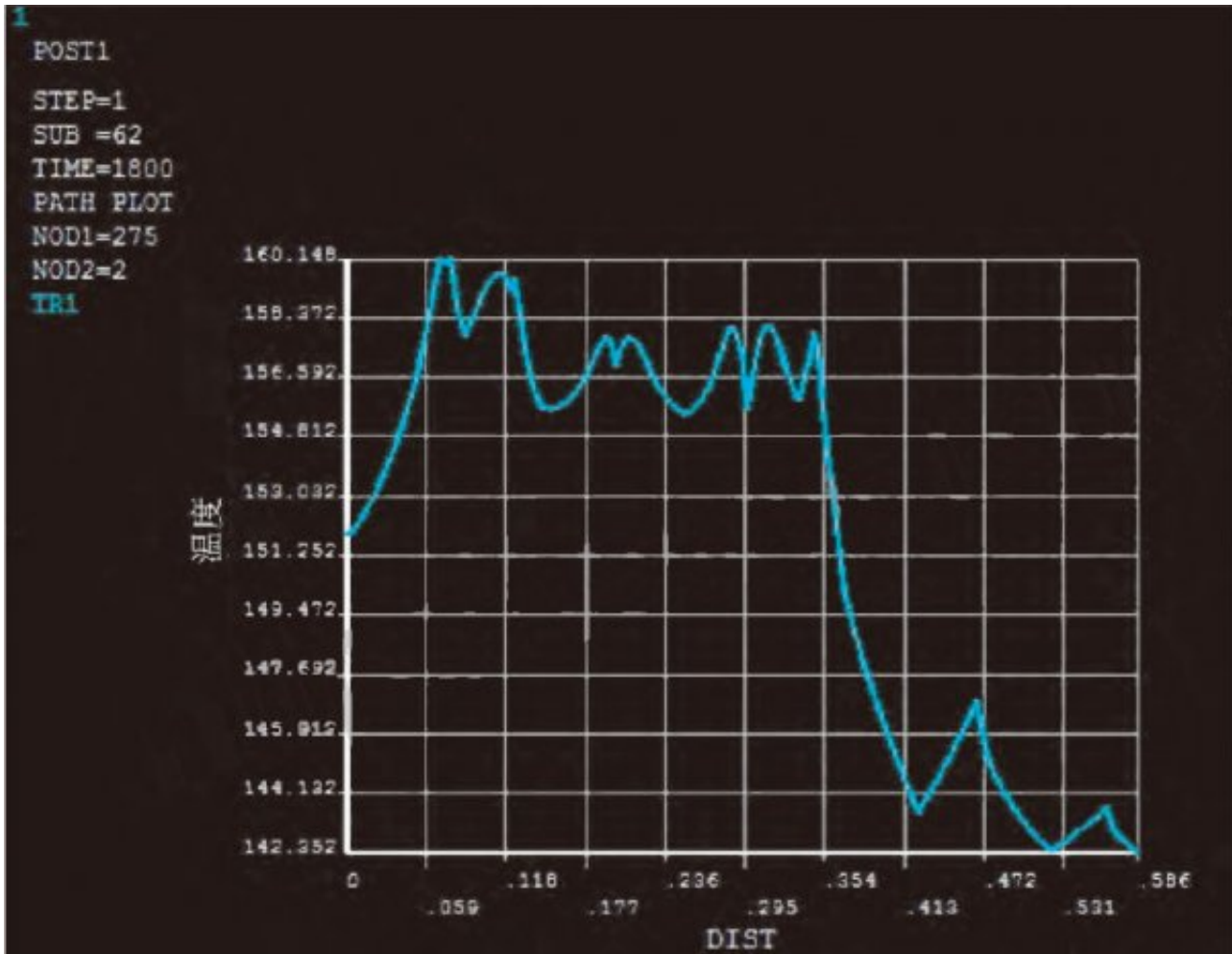


图 6 优化后轴向温度分布

Fig. 6 Axial temperature distribution after optimization

4结论

利用有限元分析软件ANSYS14.0对环模块进行温度场分析，结果表明，加热至20min后环模块的最低温度为84℃，最高温度为129℃，温度基本符合实际生产的起始温度要求。对环模块成型装置进行优化，并对优化前后的环模块成型温度场进行了对比分析，结果表明环模块优化后整体温度趋于平衡，温差明显减小，在加热20min后，环模块的温度差降为19.25℃。优化后环模块成型过程的温度场沿轴向呈现先增大，再波动状平稳，最后逐渐减小的趋势，波动状的平稳阶段较长，表明环模块大部分区域的温度趋于缓和，环模块成型温度更均匀。

参考文献

- [1] 吴再兴, 陈玉和, 包永洁, 等. 生物质固化成型燃料生产现状与发展对策 [J]. 浙江林业科技, 2014, 34(4): 83-87.
Wu Zaixing, Chen Yuhe, Bao Yongjie, et al. Current situation of densified biomass briquette fuel production and prospect [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2014, 34(4): 83-87.
- [2] 周成. 生物质固化成型燃料的开发与应用 [J]. 现代化农业, 2005(12): 38-39.
- [3] 刘晓娟, 殷卫峰. 国内外生物质能开发利用的研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2008(4): 7-9.
- [4] 陈树人, 段建, 姚勇. 环模式秸秆压块机的设计与性能试验 [J]. 农机化研究, 2013, 35(11): 140-143.
Chen Shuren, Duan Jian, Yao Yong. Ring mode straw briquetting machine design and performance test [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(11): 140-143.
- [5] 张晓东, 邱旭, 赵永杰. 基于 ANSYS 软件的挤压过程的数值模拟 [J]. 机电设备, 2012, 29(1): 74-77.
- [6] 蒋成宠. 水稻秸秆热特性的环模成型压块温度-应力场耦合分析研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
Jiang Chengchong. Analysis of coupled field of temperature-stress about rice straw briquetting molding in the vertical ring die based on experimental research of thermal properties [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015.
- [7] 帅词俊, 倪正顺. 基于 ANSYS 的三维建模方法与热挤压模具的优化设计 [J]. 机械强度, 2004(3): 345-348.
Shuai Cijun, Ni Zhengshun. Method of three dimensional model and optimum design of hot extrusion mould based on ANSYS [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004(3): 345-348.
- [8] 凌桂龙. ANSYS 14.0 热力学分析从入门到精通 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [9] Sheng C, Azevedo J L T. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data [J]. Biomass & Bioenergy, 2005, 28(5): 499-507.
- [10] 赵东. 玉米秆粉粒体模压成型的试验研究及有限元分析 [D]. 北京: 中国农业大学, 1998.
Zhao Dong. Experiment research and finite element analysis of corn stalk powder during compaction forming in a mold [D]. Beijing: China Agricultural University, 1998.
- [11] 谢龙汉, 蔡明京. ANSYS 有限元分析及仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [12] 李兵, 宫鹏涵. ANSYS 14.0 有限元分析自学手册 [M]. 北京: 人民邮电大学, 2013.
- [13] 朱伟. 挤出口模温度场有限元分析及实验研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2005.
Zhu Wei. The numerical simulation on temperature field by FEM and the research by experiment [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2005.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/170012.html>