

基于 ANSYS 的生物质液压成型模具锥角优化^{*}

刘超 董玉平 吴云玉

(高效洁净机械制造教育部重点实验室(山东大学), 济南 250061)

【摘要】 液压成型机模具锥角是影响成型的关键参数,为降低压缩过程中的摩擦力、减少消耗的压缩能、提高成型燃料的成型密度和成型品质,运用 ANSYS 参数化语言,对液压成型机模具锥角进行优化分析。研究了模具锥角值与应力分布关系、模具不同锥角时摩擦力与位移关系,得出锥角与应力分布呈二次抛物线形式。研究结果表明:模具锥角最佳取值范围为 $5.5^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ 。经试验,锥角在此范围内取值,出模后的成型燃料松弛密度增大,耐久性增加,成型密度和成型品质提高。

关键词: 生物质 模具 锥角 参数化语言 优化

中图分类号: TK6; TH122 **文献标识码:** A

Study of Mold Cone Angle of Hydraulic Briquetting Press Based on ANSYS

Liu Chao Dong Yuping Wu Yunyu

(Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture (Shandong University),
Ministry of Education, Ji'nan 250061, China)

Abstract

Mold cone angle is an important parameter. The simulation of the main molding stage of hydraulic briquetting machine was carried out with the finite element software ANSYS, in which the special ANSYS parametric design language was used to optimize analysis the mold cone angle of hydraulic briquetting press. The relationship between mold cone angle and equivalent stress was studied, along with the relationship between the friction stress and displacement in different mold cone angle values. The result indicated the best range of mold cone angle of $5.5^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ is obtained, in which, the simulation results are approximately in accordance with the measured values. Furthermore, the briquette block has a good density, and quality, and is suitable for storage and transportation.

Key words Biomass, Mold, Cone angle, ANSYS parametric design language, Optimization

引言

生物质固化成型技术是将生物质原料经干燥、粉碎到一定粒度,在一定湿度、压力和温度条件下,使生物质原料颗粒位置重新排列并发生机械变形和塑性变形,成为形状规则、密度较大、燃烧值较高的固体燃料的过程。同其他成型技术相比,液压成型技术设备运行稳定性好、噪声小、原料适用性强,可实现大规模的生产和应用。目前国内外对生物质液压成型方面的研究,主要集中在原料种类、含水率、

粒度、温度、成型压力等方面的试验研究和理论探讨上^[1~4],对液压成型主要部件——模具的研究较少。O'Dogherty 等研究了压模直径、喂入量和保型时间对压缩成型的影响^[5],得出影响生物质成型因素与成型品质及能耗间的关系,但研究中没有考虑模具锥角对成型的影响。液压成型模具锥角是影响成型的关键参数,锥角大小影响压缩过程中的摩擦力和消耗的压缩能,决定生物质成型密度和成型品质。传统工业生产中液压模具的设计一般采用“Trial and Error”方法。该方法需反复试模、修模,

收稿日期: 2009-05-22 修回日期: 2009-06-18

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA05Z243)

作者简介: 刘超, 硕士生, 主要从事机械设计及生物质能技术研究, E-mail: chao121927@163.com

通讯作者: 董玉平, 教授, 博士生导师, 主要从事机械及生物质能转化技术研究, E-mail: dongyp@sdu.edu.cn

成本高,周期长。本文针对液压成型机主成型阶段,采用 ANSYS 有限元模拟软件进行数值模拟,运用其特有的 APDL 参数化语言对模具锥角进行优化研究,对优化后的结果进行试验与对比分析。

1 模具内物料受力分析

液压成型机主要依靠物料与主要成型部件——模具之间的摩擦力和锥型腔形成的挤压阻力实现原料的压缩成型,原料挤压所需要的成型压力与挤压模具内壁的摩擦力相平衡,而摩擦力大小与模具的形状尺寸有直接关系。对模具锥角进行优化,首先要分析物料在挤压过程中的受力情况,考虑到模具的轴对称性,取模孔截面的 A-A 剖视图作受力分析。图 1 为液压成型机及模具内物料受力图。

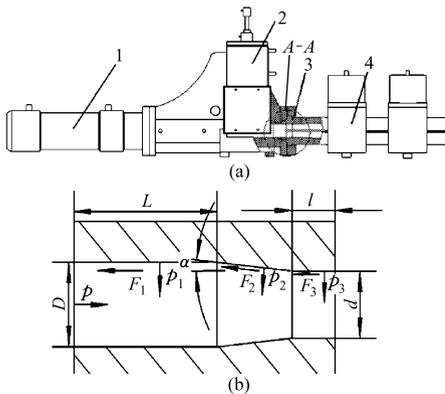


图 1 液压成型机及成型模具内物料受力图

Fig. 1 Hydraulic briquetting press and the stress distribution of biomass in mold

(a) 液压成型机 (b) 模具内物料受力图

1. 主液压缸 2. 预压缸 3. 模具 4. 压紧钳液压缸

取径向为 x 轴,轴向为 y 轴,建立平衡方程

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ p = F_1 + F_3 + \frac{F_2}{\cos\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

式中 p ——成型压力 α ——模具锥角

F_1 ——成型区模壁对物料的摩擦力

F_2 ——锥型区模壁对物料的摩擦力

F_3 ——保型区模壁对物料的摩擦力

由摩擦力计算公式 $F = \mu p$ 代入式(1),得

$$\begin{aligned} p\pi D^2 &= \mu p_1 2\pi DL + \mu p_3 2\pi dl + \\ &\mu p_2 \pi (D^2 - d^2) / \cos\alpha = \\ &\mu \varepsilon p 2\pi DL + \mu \varepsilon p_2 2\pi dl / \cos\alpha + \\ &\mu p_2 \pi (D^2 - d^2) / \cos\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

即

$$p = \frac{p_2}{\cos\alpha} \frac{2\varepsilon dl}{D^2} + 1 - \frac{d^2}{D^2} \mu \quad (3)$$

$$1 - \frac{2\mu \varepsilon L}{D}$$

式中 p_1 ——成型区模壁对物料施加的单位压力

p_2 ——锥型腔模壁对物料施加的单位压力

p_3 ——保型区模壁对物料施加的单位压力

D ——模具大端直径

d ——模具小端直径

L ——成型区长度 l ——保型区长度

μ ——摩擦因数 ε ——侧压系数

由式(3)可以看出,挤压过程中影响物料成型压力的因素主要是物料的性能参数 ε 、 μ 和模具的结构尺寸。当其他参数取值一定的情况下,锥角 α 是影响成型压力的关键因素,决定生物质成型品质和成型密度。

2 模型建立

2.1 几何模型

按物料的不同受力情况,液压成型压缩过程分为预压缩、主压缩和挤出保型 3 个阶段。选取成型的主压缩阶段作为研究对象。

液压成型模具的结构具有轴对称性,考虑到计算成本及二维模型数值模拟与实际的拟合度,故此研究取模孔截面的 1/2 为研究对象。研究采用 ANSYS 的 APDL 参数化语言建立成型的二维轴对称几何模型如图 2 所示,固定大小端面积比在 1.2~1.5 之间,只改变锥角 α 便可以建立新的分析模型。图中, b 为模具锥长。

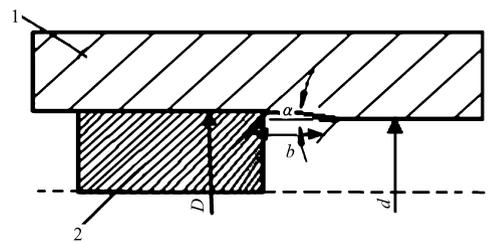


图 2 模型半剖面示意图

Fig. 2 Semi-section of mold

1. 生物质 2. 成型模具

2.2 材料属性和单元类型

选用棉秆作为研究对象,在压缩成型过程中,建立棉秆、模具、接触对 3 种材料模型,其材料属性如表 1 所示。

考虑液压模具锥角的存在对网格划分的影响,单元类型选择具有八节点的高阶二维 Plane 82 单元。考虑生物质固化成型时挤压摩擦大变形的特点,选用二维面-面接触单元 Target 169 和 Contact 172 来模拟棉秆与模具的摩擦接触。

2.3 网格划分

对所建立的有限元模型进行网格划分,棉秆在挤压过程中因有塑性变形且产生较大的位移,采用

自适应网格划分;对模具,则采用智能分网控制生成自由网格。

表 1 3 种材料属性表

Tab.1 Property of three kinds of materials

部件	项目	数值
棉秆	密度(松装密度) $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	365
	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	32.76
	粘聚力 C/kPa	24.62
	切变模量 G/MPa	4.2×10^3
	泊松比 ν_1	0.38
模具	弹性模量 E/MPa	2.06×10^5
	泊松比 ν_2	0.30
接触对	摩擦因数 μ	0.28

2.4 施加载荷、约束及求解

液压成型模具工作环境涉及空间、力等载荷条件,因此在挤压成型过程中所施加的载荷、约束、边界条件涉及位移、压力等。模具和机器本体相连,外表面为固定约束,两端面和机器的其他部件固定相连,也采用固定约束。由于结构采用对称形式,成型块的左侧采用对称约束。在成型块的上部施加压力和位移作为载荷。

考虑到模型状态非线性接触问题涉及内容的复杂性和摩擦的影响,在求解前做如下规定:在求解控制项中 Sol'n Controls 中选 Large Displacement Static,考虑大变形影响,打开自动时间步预测,在 Analysis Options 中打开 Large deform effect。将牛顿-拉普森选项设置为 Full N-R unsymm 算法。采用线性搜索(line search),目的是避免较大的时间增量导致迭代变得不稳定。

3 后处理结果分析

通过 ANSYS 提供的 APDL 参数化设计语言编制模具锥角 α 的优化程序,通过改变锥角 α 参数值建立新的分析模型。对比螺旋挤压成型中螺旋角的取值,考虑成型模具的锥角过大易形成死角,为使物料能在模具中稳定成型和推出,优化设计的锥角 α 不大于 10° 。

3.1 锥角与应力关系

采用 APDL 参数化语言优化模具锥角,得到锥角与模具最大等效应力关系曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出,锥角与等效应力间呈现二次抛物线关系,锥角 α 在 $5.5^\circ \sim 6.0^\circ$ 范围内,等效应力相对较小。这主要是因为:在主压缩阶段,同时存在压应力和剪应力,当 α 角减小时,物料向中间部位移动较少,应力变形主要集中在模具整个锥面上,压

应力增大,应力曲线上升;当 α 角增大时,物料快速向中间积累,受压变形的物料增多,压应力相对减少,剪应力增加,应力曲线呈上升趋势。在锥型腔处,压应力和剪应力同时存在。此处的材料为模具上应力集中最为严重的地方,应力超过模具的屈服强度时,在此薄弱部位产生微小裂纹,摩擦磨损严重到一定程度,模具失效。合理设计模具锥角能提高模具使用寿命。

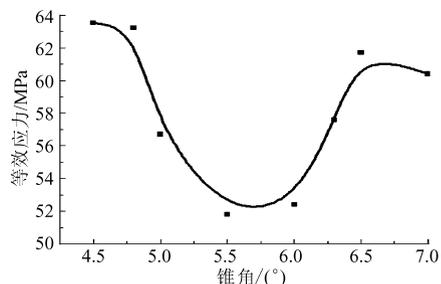


图 3 锥角与等效应力关系曲线

Fig. 3 Relation between cone angle (α) and stress

3.2 不同锥角时摩擦力与位移关系

模具锥角为 $5.0^\circ, 5.5^\circ, 6.0^\circ$ 和 7.0° 时摩擦力与位移关系曲线如图 4 所示。

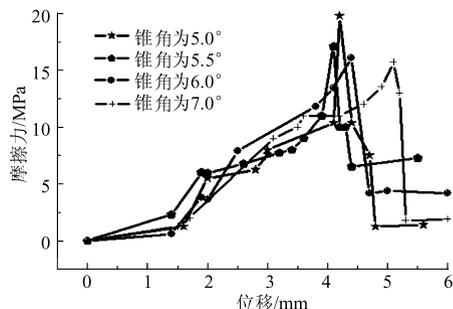


图 4 不同锥角时摩擦力与位移关系曲线

Fig. 4 Relation between friction and displacement in different cone angle

从图 4 可以看出,锥角不同对摩擦力的影响也不同,但存在相同的影响趋势:在挤压开始阶段摩擦力较小,因物料本身流动性差和相互牵连的特性,摩擦力以不规则的形式增大;当移动到模具锥型腔附近,作用于锥型面上的压力达到最大,受到的摩擦力最大,而后作用压力逐渐减少,摩擦力迅速下降并趋于稳定。这主要是因为成型开始时以压实致密为主,增长较缓,随着塑性变形的增加,施加的压力增大,摩擦力迅速增大,在锥型腔处,由于模壁侧压力的增加,摩擦力达到最大值,经过锥型腔区域后,侧压力减小,摩擦力下降趋于稳定。当模具锥角取 $5.5^\circ \sim 6.0^\circ$ 时,摩擦力与位移关系曲线变化较平稳,挤压过程中产生的摩擦力相对较小,应力在模具上均匀分布。图 5 为模具锥角取 6.0° 时产生的摩擦力分布图。

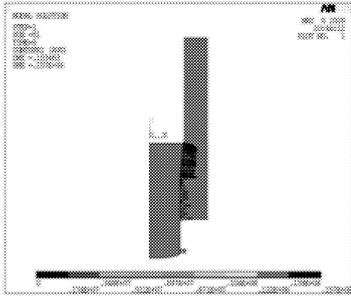


图5 锥角为6.0°时摩擦力分布图

Fig.5 Friction drawing in cone angle of 6.0°

4 试验

为了对比优化前模具锥角与优化后模具锥角对成型燃料成型品质和成型密度的影响,在液压成型机上进行了试验。试验中选取的液压成型设备除成型模具锥角不同外,其余结构参数完全相同;试验所需原料种类、粒度、含水率及每次成型时所需原料质量亦完全相同。试验以棉秆为原料,粉碎粒度为5 mm,含水率为15%,初始密度365 kg/m³。

4.1 成型燃料外形对比分析

优化前成型模具锥角与优化后成型模具锥角出模后的棉秆成型燃料外形对比如图6所示。从图6可以看出,模具锥角优化前成型燃料比较粗糙,密度低,放置一段时间后表面出现严重裂纹现象,不便储藏、运输;优化后的成型燃料表面光滑,密度高,成型品质好,便于储藏运输。

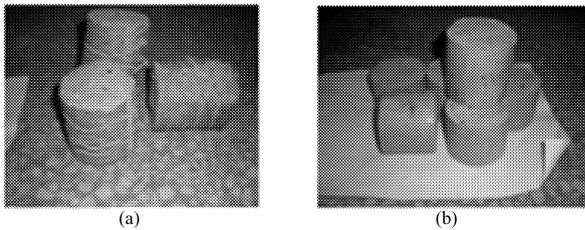


图6 棉秆成型燃料外形对比图

Fig.6 Comparison of cotton-stalk briquettes shape

(a) 优化前 (b) 优化后

4.2 成型燃料性质对比分析

在生物质成型燃料性质中,松弛密度和耐久性是衡量成型燃料品质的两个重要指标,直接决定成型燃料的使用、运输和贮藏条件。

4.2.1 松弛密度对比分析

生物质成型燃料在出模后,由于弹性变形和应力松弛,其密度逐渐减小,一段时间后密度趋于稳定,此时成型燃料的密度称为松弛密度^[9]。将优化前成型模具与优化后成型模具出模后的成型燃料放置3 h,用游标卡尺测出直径 R 和高度 h 。每次试验前称取棉秆质量 m ,记录活塞最大位移 s ,每组测试5次,取平均值,物料起始厚度 H 。

最大压缩密度

$$\gamma_{\max} = \frac{4m}{\pi D^2(H-s)} \quad (4)$$

松弛密度

$$\gamma = \frac{4m}{\pi R^2 h} \quad (5)$$

松弛比

$$r = \frac{\gamma_{\max}}{\gamma} \quad (6)$$

通过上述公式进行数据处理,处理后的对比分析结果如表2所示。

表2 优化前与优化后模具锥角对松弛密度影响

Tab.2 Effect of optimization for mold cone angle on

relax density

成型燃料	初始密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	最大压缩密度 $\gamma_{\max}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	松弛密度 $\gamma/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	松弛比 比 r
模具优化前	365	1 347.0	819.4	1.644
模具优化后	365	1 458.7	935.6	1.560

由表2可以看出,在试验条件相同的情况下,模具锥角优化后的成型燃料与模具锥角优化前的成型燃料相比,成型燃料的松弛密度增大,松弛比减小,成型燃料成型密度好,便于使用。

4.2.2 耐久性对比分析

耐久性反映成型燃料的粘结性能,决定成型燃料的使用和贮藏性能。抗渗水性是衡量耐久性的重要性能指标^[10]。分别将优化前与优化后的成型燃料样品置于25°的水面下10 mm,持续时间30 s,观察吸水现象。成型模具锥角优化前的成型燃料吸水性强,体积膨胀快,形状基本改变,松散、裂纹严重,极易碎;成型模具锥角优化后的成型燃料吸水性强,体积膨胀较慢,直径变化不大,高度增加,有一定硬度,不易碎。图7为优化前与优化后棉秆成型燃料吸水后的特征对比图。可见锥角优化后的成型模具能大大提高成型块的成型品质和成型密度。

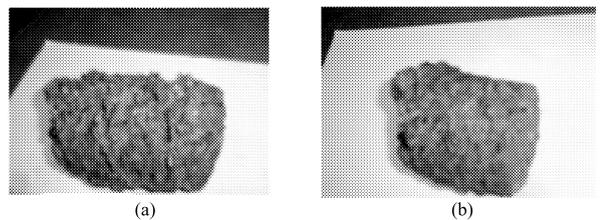


图7 棉秆成型燃料吸水后特征对比

Fig.7 The comparison for feature of cotton stalk briquettes

(a) 锥角优化前 (b) 锥角优化后

5 结论

(1) 通过使用 ANSYS APDL 参数化语言对在其他参数取值一定时的模具锥角进行优化设计,研

究发现液压成型模具锥角是影响成型的关键参数, 锥角大小影响压缩过程中的等效应力和摩擦力。当模具锥角在 $5.5^{\circ} \sim 6.0^{\circ}$ 范围内, 成型模具受力均匀, 物料压缩流动性和成型性好。

(2) 模具锥角对成型块的成型密度和成型品质影响显著。经优化后的成型模具挤压成型的成型块

较优化前成型品质好, 成型密度高, 宜于使用、存储和运输。

(3) APDL 参数化建模能较好地模拟生物质物料挤压成型过程。当改变操作条件或选取不同物料时, 只需修改相关参数, 便可经过优化得到不同的优化结果。

参 考 文 献

- 1 胡建军, 雷廷宙, 何晓峰, 等. 小麦秸秆颗粒燃料冷态压缩成型参数试验研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(2): 241~246.
Hu Jianjun, Lei Tingzhou, He Xiaofeng, et al. Experimental research on the compressing molding parameter under cold conditions for wheat straw pellet fuel[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(2): 241~246. (in Chinese)
- 2 回彩娟, 俞国胜. 影响生物质块状燃料常温高压致密成型因素的研究[J]. 林业机械与木工设备, 2005(11): 10~14.
Hui Caijuan, Yu Guosheng. A study on the influencing factors of biomass briquette forming with high pressure of general conditions of bio-materials solidification fuel[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2005(11): 10~14. (in Chinese)
- 3 Lindley J A, Vossoughi M. Physical properties of biomass briquets[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 361~366.
- 4 何晓峰, 雷廷宙, 李再峰, 等. 生物质颗粒燃料冷成型技术试验研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(9): 937~941.
He Xiaofeng, Lei Tingzhou, Li Zaifeng, et al. Research of biomass fuel cold compression molding technic[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2006, 27(9): 937~941. (in Chinese)
- 5 O'Dogherty M J, Wheeler J A. Compression of straw to high densities in closed cylindrical dies[J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 1984, 29(1): 61~72.
- 6 马孝琴. 生物质(秸秆)成型燃料燃烧动力学特性及液压秸秆成型机改进设计研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
Ma Xiaoqin. Study on kinetic characteristics of biomass (straw) briquettes combustion and improvement design of hydraulic straw briquetting press[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 7 董玉平, 高名望, 孙启新. 秸秆类生物质固化成型有限元模拟[J]. 山东大学学报: 工学版, 2005, 35(5): 9~14.
Dong Yuping, Gao Mingwang, Sun Qixin. The finite element simulation of straw and stalk biomass press briquetting[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2005, 35(5): 9~14. (in Chinese)
- 8 Butler B J, McColly H F. Factors affecting the pelleting of hay[J]. Agricultural Engineering, 1959, 40(8): 442~446.
- 9 王建祥, 蔡红珍. 生物质压缩成型燃料的物理品质及成型技术[J]. 农机化研究, 2008, 30(1): 203~205.
Wang Jianxiang, Cai Hongzhen. Review on physical properties and forming technology of biomass fuel compressed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(1): 203~205. (in Chinese)
- 10 盛奎川, 吴杰. 生物质成型燃料的物理品质和成型机理的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 242~245.
Sheng Kuichuan, Wu Jie. Review on physical properties and forming mechanisms of biomass briquettes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2): 242~245. (in Chinese)

(上接第 96 页)

- 10 Landers A. A compressed air direct injection crop sprayer[J]. Optimising Pesticide Applications, 1997, 48(3): 25~32.
- 11 周凤芳, 徐幼林, 周宏平. 喷雾机混药装置的研究现状与发展[J]. 中华卫生杀虫药械, 2005, 11(6): 319~320.
Zhou Fengfang, Xu Youlin, Zhou Hongping. Research situation and development of mixing pesticide equipment for sprayer [J]. Chinese Journal of Hygienic Insecticides of Equipments, 2005, 11(6): 319~320. (in Chinese)
- 12 吴萍, 陈长林, 赵刚. 背负式手动喷雾器混药装置研究[J]. 中国农机化, 2005(5): 33~35.
Wu Ping, Chen Changlin, Zhao Gang. Research of mixing device for knapsack sprayer [J]. Chinese Agriculture Mechanization, 2005(5): 33~35. (in Chinese)
- 13 Liu Zhizhuang, Hong Tiansheng, Zhang Wenzhao, et al. Novel liquid flow sensor based on differential pressure method [J]. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(1): 015108-1~015108-5.
- 14 Saleh J M. 流体流动手册[M]. 邓敦夏, 译. 北京: 中国石油出版社, 2004: 258~262.
- 15 刘志壮. 药液实时精确计量与变量喷雾控制[D]. 广州: 华南农业大学, 2008.
Liu Zhizhuang. Real-time gauging of accuracy and variable rate spraying control[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 16 刘志壮, 洪添胜, 李震, 等. 基于模糊控制的流量阀仿真[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 83~86.
Liu Zhizhuang, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Simulation of flow control valve based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 83~86. (in Chinese)