

材料、机械工程

文章编号: 1000-8608(2014)05-0506-05

# 捣固煤饼工艺参数正交仿真试验设计

王剑松, 王殿龙\*, 曹旭阳, 张岩

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 捣固锤质量、抬锤高度、捣固锤数量等工艺参数对捣固炼焦相关设备的设计和应用起着决定性的作用, 当前这些参数多采用经验选取, 并无明确的理论支撑。以捣固效率和捣固功为指标, 结合 DKM 本构关系模拟煤饼, 对捣固煤饼过程进行正交仿真试验, 并对结果进行了分析, 得出了合理的捣固工艺参数组合。试验为捣固煤饼工艺参数的选取和相关设备的设计提供了一种新方法。

**关键词:** 捣固煤饼工艺参数; 正交试验; 仿真

中图分类号:TQ520.5

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb201405004

## 0 引言

捣固炼焦是一种对炼焦煤的预处理工艺, 它将粉碎加湿后的煤用捣固锤冲击压实成长约 15 m, 宽约 0.5 m, 最高约 6 m 的煤饼后, 再送入炭化室炼制成焦炭。与传统工艺相比, 捣固炼焦具有原料范围广, 制备的焦炭质量高, 且更加环保等优点<sup>[1]</sup>。在焦炭总产能降低的背景下, 捣固焦产能将持续提高, 预计到 2025 年, 捣固焦将占我国焦炭总产能的 50%<sup>[2]</sup>, 具有广阔的发展前景。

捣固锤质量、数量, 以及抬锤高度等工艺参数是捣固炼焦相关设备的重要指标, 对捣固煤饼的生产效率、质量, 以及捣固装煤车、捣固机等设备的设计、制造和应用起着决定性作用。当前设计中, 这些参数多采用经验类比, 并没有明确的理论依据。同时捣固炼焦相关研究又多集中于原料煤粉配比<sup>[3-5]</sup>, 以及影响煤饼密度、强度的因素的分析上<sup>[6-8]</sup>, 而对煤饼捣固过程的研究较少。Sand 等<sup>[9]</sup>曾采用二维离散元仿真了实验室模型的捣固过程, 仿真与实验结果吻合良好, 但受限于颗粒规模, 这种方法尚不能应用于现场实际煤饼的捣固计算。针对这一问题, 大连理工大学结合现场测试与分析<sup>[10]</sup>, 提出了一种适于分析捣固煤饼的 DKM 本构关系<sup>[11]</sup>。本文将以此为基础对捣固煤饼工艺参数进行仿真分析优化。

正交试验法在结构优化设计等诸多领域均有应用<sup>[12-13]</sup>。本文采用正交试验的思路, 结合 DKM 本构关系, 以提高捣固煤饼生产效率为目标, 找出对其影响最大的工艺参数因素, 提出相应的试验指标, 并以此为基础对捣固冲击过程进行仿真试验, 随后对正交试验结果进行分析, 得出针对捣固效率的最佳工艺参数组合, 为捣固煤饼工艺参数选取, 乃至相关设备的设计提供一种新的思路。

## 1 DKM 本构关系

组成煤饼的粉末颗粒级别为 0.25~3 mm<sup>[14]</sup>, 考虑煤饼的总体尺寸, 捣固煤饼颗粒数量规模较大, 一些以颗粒为基础的方法, 如 DEM、SPH 等, 不适用于此类问题的工程分析。因此, FEM(有限元法)仍为分析实际捣固煤饼的首选方法。

显然, 煤饼的非线性本构关系是此类问题的核心。文献[11]参考粘弹性力学中的一种思路<sup>[15]</sup>, 将土力学中的 Duncan-Chang(DC)本构关系模型与流变力学中的 Kelvin 和 Maxwell 模型相结合, 构造出了一种 DKM 本构关系。它既结合了 DC 模型对非线性压缩的模拟能力及参数易于获取的工程应用特性, 又满足了捣固仿真对冲击硬化等的需求, 是一种适用于捣固煤饼计算的基本模型。

构关系. 它的一维结构如图 1 所示, 其中 D 代表 DC 模型构成的元件. 可见, DKM 模型中, D 元件与粘壶 M 串联形成了 Maxwell 模型; D 元件与粘壶 K 并联形成了 Kelvin 模型.

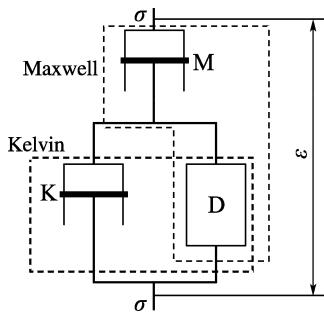


图 1 一维 DKM 本构关系

Fig. 1 One dimensional DKM constitutive relation

将图 1 的本构关系三维化, 着眼于有限元法计算过程, 采用基本增量法和中心差分法求解得到的偏微分方程组, 可得应力增量:

$$\begin{cases} c_0 \Delta \sigma_i = c_1 \sigma_{Di} + c_2 \sigma_i + c_3 \Delta \varepsilon_i + c_4 \Delta \varepsilon_0 \\ d_0 \Delta \tau_{ij} = d_1 \tau_{Dij} + d_2 \tau_{ij} + d_3 \Delta \tau_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_i$  代表某方向正张量,  $\tau_{ij}$  代表某方向剪张量, D 代表 DKM 模型中 D 元件.  $\varepsilon_0$  为应变球张量. 式(1) 中各项的系数分别为

$$c_0 = \frac{2E_D(1+\nu_D)(\zeta_M + \zeta_K) + E_D^2 \Delta t}{4\zeta_M(1+\nu_D)}$$

$$c_1 = E_D$$

$$c_2 = -2c_0$$

$$c_3 = \frac{2E_D(1+\nu_D) + E_D^2 \Delta t}{2(1+\nu_D)\Delta t}$$

$$c_4 = \frac{E_D(-\zeta_K + 4\zeta_K\nu_D + 5\zeta_K\nu_D^2 + 3\nu_D E_D \Delta t)}{2(1-2\nu_D)(1+\nu_D)\Delta t}$$

$$d_0 = \frac{\zeta_M + \zeta_K + \mu_D \Delta t}{2\zeta_M}$$

$$d_1 = 1$$

$$d_2 = -2d_0$$

$$d_3 = \frac{\zeta_K + \mu_D \Delta t}{2\Delta t}$$

其中  $E_D$ 、 $\nu_D$  分别代表 DKM 模型中 D 元件的切线弹性模量和切线泊松比,  $\zeta_M$  和  $\zeta_K$  分别为 M、K 元件的阻尼系数,  $\Delta t$  为时间增量,  $\mu_D$  为拉梅常量.

本文将以此本构关系为基础, 对捣固煤饼工艺参数进行分析计算.

## 2 正交试验设计

试验目的是分析在不同的工艺参数下捣固效

率的变化情况, 从而找出一组捣固效率较高的参数组合作为煤饼捣固的工艺参数. 同时, 为避免设备经济性下降, 甚至相关设备荷载水平超标, 还需要对各种参数组合下捣固功的大小进行限制. 综上, 本正交试验选用了双指标:(1)使煤饼压实到堆密度  $1 \text{ t/m}^3$  时的冲击捣固次数, 并以此代表捣固效率;(2)使煤饼压实到  $1 \text{ t/m}^3$  时所需要的捣固功大小.

本文选取在捣固煤饼相关设备设计中, 与煤饼成形效率关系密切, 且经常发生变化的捣固锤质量、抬锤高度, 以及总的捣固锤的数量 3 项参数作为试验因素进行分析. 综合考虑国内外已有设备的设计参数, 最终决定的仿真试验工艺参数水平取值见表 1.

表 1 捣固工艺参数水平

Tab. 1 Stamping design parameter level

参数水平	捣固锤质量/kg	抬锤高度/mm	捣固锤数量/个
1	350	400	24
2	450	500	28
3	550	600	32

根据捣固工艺参数和参数水平, 结合选用正交表所需要遵循的原则, 选择试验方案表见表 2, 设置捣固锤质量为因素 A; 抬锤高度为因素 B; 捣固锤数量为因素 C.

表 2 试验方案表

Tab. 2 Test scheme table

编号	捣固锤质量/kg(A)	抬锤高度/mm(B)	捣固锤数量/个(C)
1	1(350)	1(400)	1(24)
2	1(350)	2(500)	2(28)
3	1(350)	3(600)	3(32)
4	2(450)	1(400)	2(28)
5	2(450)	2(500)	3(32)
6	2(450)	3(600)	1(24)
7	3(550)	1(400)	3(32)
8	3(550)	2(500)	1(24)
9	3(550)	3(600)	2(28)

## 3 仿真实现

以华北某地现场测试设备为仿真对象<sup>[10]</sup>, 煤饼实际长 15210 mm, 宽 500 mm, 因目的为考察压实效果, 选取煤饼高度为预装煤高度 800 mm. 仿真在 ABAQUS CAE 平台上进行, 计算采用隐式积分算法中的 Newmark 法, 单元采用对应算

法下的 8 节点线性减缩积分单元。

本构关系利用 UMAT 模块将推导出的 DKM 模型式(1)嵌入 ABAQUS 计算中,程序用 Fortran 语言编写。冲击前煤饼为静止状态,求得冲击前 DKM 模型中各元件的应力分配情况,以此为基础对各时间增量的元件应力进行累加,可以实现各元件在不同时间增量的初始应力分配。

计算中将煤饼宽度方向设为  $x$ ,高度方向设为  $y$ ,长度方向设为  $z$ 。为节约计算资源,只建立煤饼和捣固锤的 1/4 模型,并将其在相应面上作对称约束,如图 2 所示。此外,还约束了煤饼底面的  $y$  方向位移、侧面的  $x$  方向位移,以及背面的  $z$  方向位移。由于不关心捣固锤应力,将捣固锤建为刚体,其质量和捣固面积与实际相同。不同抬锤高度通过对捣固锤施加不同的初速度实现。连续冲击通过 ABAQUS 的数据传递实现。

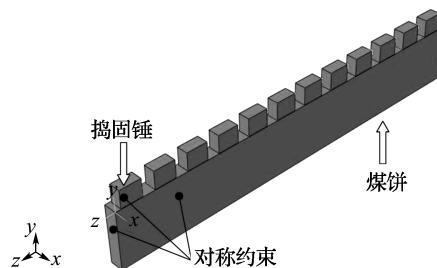


图 2 每锤 450 kg 的 24 锤计算模型

Fig. 2 Calculation model with 24 stampers, 450 kg each

## 4 结果分析

依照表 2 中试验方案依次建立模型并进行仿真计算,得到结果见表 3。

采用极差法对数据进行处理。计算各因素对应的捣固功与捣固次数之和,同时计算平均值和极差,进行整理,结果见表 4。表中  $K_i$  代表某因素在第  $i$  个水平下,某指标仿真试验结果之和;  $k_i$  为其均值;  $R$  为该因素不同水平下仿真试验结果的极差。

由正交表的综合可比性,可以得出对捣固效率的最优组合为 A3B3C3; 对捣固功的最优组合为 A1B1C3。根据极差大小,可以判断各因素影响主次。即对于捣固效率 C>A>B; 对于捣固功 B>C>A。

表 3 捣固仿真试验结果

Tab. 3 Stamping simulation test results

编号	A	B	C	捣固次数/次	捣固功/kJ
1	1(350)	1(400)	1(24)	10	13.720
2	1(350)	2(500)	2(28)	9	15.435
3	1(350)	3(600)	3(32)	7	14.406
4	2(450)	1(400)	2(28)	9	15.876
5	2(450)	2(500)	3(32)	7	15.435
6	2(450)	3(600)	1(24)	9	23.814
7	3(550)	1(400)	3(32)	6	12.936
8	3(550)	2(500)	1(24)	8	21.560
9	3(550)	3(600)	2(28)	7	22.638

为更直观地考察各因素水平对指标的影响程度,绘制趋势图如图 3、4 所示。

由图可见,对于捣固效率指标,3 个因素的增大均有有利于指标的提高,且捣固锤质量(A)与数量(C)的影响呈加速趋势,而抬锤高度(B)的影响较为均匀;对于捣固功指标,因素 A 与 B 的增大对其不利,而因素 C 的增大对其有利。由此可以判断,在可能的情况下,应尽量采用多锤捣固的方式。

用综合平衡法对试验结果进行分析:(1)因素 A 对捣固效率为次要因素,对捣固功为非主要因素,据此选择较优水平 A2 为合理因素;(2)因素 B 对捣固效率为非主要因素,对捣固功为主要因素,同时结合捣固功计算结果,可得 B2 为合理因素;(3)因素 C 对捣固效率为主要因素,对捣固功为次要因素,因此因素 C 应选取最优水平 C3。综上,兼顾捣固效率和捣固功两个指标,最优的捣固工艺参数组合为 A2B2C3,即捣固锤质量 450 kg,抬锤高度 500 mm,捣固锤 32 个的组合形式。

表 4 数据整理结果

Tab. 4 Data sorting results

因素	捣固次数/次							捣固功/kJ						
	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R$	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R$
A	26	25	21	8.7	8.3	7.0	1.7	43.561	55.125	57.134	14.52	18.38	19.04	4.52
B	25	24	23	8.3	8.0	7.7	0.6	42.532	52.430	60.858	14.18	17.48	20.29	6.11
C	27	25	20	9.0	8.3	6.7	2.3	59.094	53.949	42.777	19.70	17.98	14.26	5.44

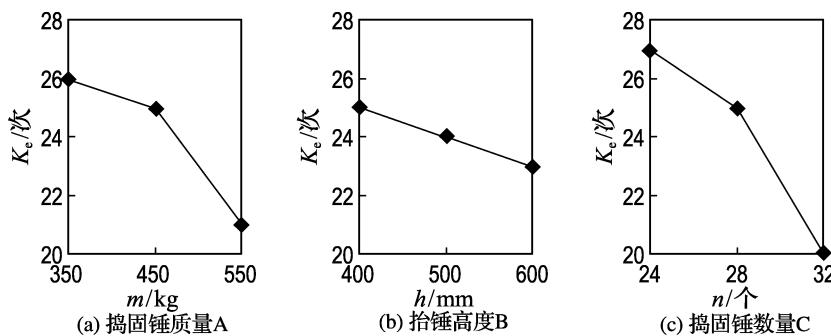


图 3 各因素水平对捣固效率指标影响趋势图

Fig. 3 Trend chart of stamping efficiency over parameter level

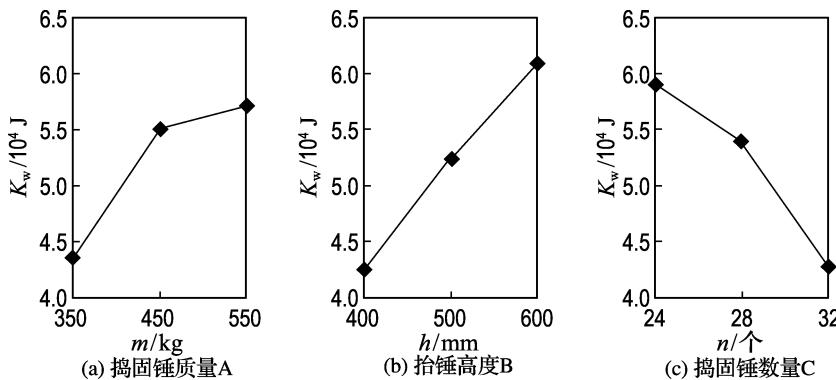


图 4 各因素水平对捣固功指标影响趋势图

Fig. 4 Trend chart of stamping work over parameter level

## 5 结语

本文选取捣固锤质量、抬锤高度和捣固锤数量 3 项捣固工艺参数为因素,通过对捣固过程的正交仿真试验,得到了以捣固效率和捣固功为指标的最优工艺参数组合,即捣固锤质量 450 kg,抬锤高度 500 mm,捣固锤 32 个;分析了各因素对于指标的重要程度,为捣固装煤车等设备的设计和应用提供了指导。同时指出了在可能的情况下,应尽量增加捣固锤数量的设计方向。

通过对 DKM 本构模型的开发和应用,可知它是一种仿真煤饼捣固过程的有效工具,以此为基础可以分析捣固炼焦设备设计过程中关心的其他问题,如冲击对设备产生的压力等,也可以对相关设备结构进行改进优化。

本文只选取了对煤饼成形效率影响最大的 3 个因素进行分析,而在实际设计中,根据具体情况,指标和因素水平可能会有所变化,或加入更多的指标和因素,届时可以用本文同样的方法进行建模分析,得到合理的参数组合。

## 参考文献:

- [1] 王翠萍. 捣固炼焦工艺优势分析[J]. 中国煤炭, 2010, 36(6):92-94.  
WANG Cui-ping. An analysis of coal tamping blending for coke making and its advantage [J]. China Coal, 2010, 36(6):92-94. (in Chinese)
- [2] 潘登. 我国捣固炼焦技术的进步与发展方向[J]. 燃料与化工, 2013, 44(2):1-2, 7.  
PAN Deng. Improvement and development of stamp-charging coking technology in China [J]. Fuel & Chemical Processes, 2013, 44(2):1-2, 7. (in Chinese)
- [3] Dash P S, Guha M, Chakraborty D, et al. Prediction of coke CSR from coal blend characteristics using various techniques: A comparative evaluation [J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2012, 32(4):169-192.
- [4] Prachethan Kumar P, Barman S C, Singh S, et al. Influence of coal fluidity on coal blend and coke quality [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2008, 35(6):416-420.

- [5] Dash P S, Krishnan S H, Sharma R, et al. Laboratory scale investigation on maximising utilisation of carbonaceous inerts in stamp charging to improve coke quality and yield [J]. **Ironmaking and Steelmaking**, 2007, **34**(1):23-29.
- [6] Kuyumcu H Z, Rosenkranz J, Abel F. Densification behavior of coking coals within stamp charge operation [C] // **International Coal Preparation Congress 2010**. Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2010:947-956.
- [7] Abel F, Rosenkranz J, Kuyumcu H Z. Stamped coal cakes in cokemaking technology: Part 1-a parameter study on stampability [J]. **Ironmaking and Steelmaking**, 2009, **36**(5):321-326.
- [8] Abel F, Rosenkranz J, Kuyumcu H Z. Stamped coal cakes in cokemaking technology: Part 2-the investigation of cake strength [J]. **Ironmaking and Steelmaking**, 2009, **36**(5):327-332.
- [9] Sand A, Rosenkranz J, Kuyumcu H Z. Modelling and simulation of stamp-charged coke making by 2-D discrete element method [J]. **Advanced Powder Technology**, 2013, **24**(6):1039-1047.
- [10] WANG Jian-song, WANG Dian-long, GAO Shunde, et al. Research on stamp charging car coal box pressure through field test [J]. **Ironmaking and Steelmaking**, 2013, **40**(7):528-533.
- [11] WANG Jian-song, WANG Dian-long, ZHAO Hong-hua. Stamping coal cake simulation with Duncan-Kelvin-Maxwell constitutive relations [J]. **Ironmaking and Steelmaking**, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1743281214Y.0000000198>.
- [12] 宋满仓, 刘柱, 于同敏, 等. 注射工艺参数对超薄塑件成型影响实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, **46**(2):198-201.
- SONG Man-cang, LIU Zhu, YU Tong-min, et al. Research on effects of injection process parameters on molding process for ultra-thin wall plastic parts [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2006, **46**(2):198-201. (in Chinese)
- [13] 邹国林, 郭东明, 贾振元, 等. 熔融沉积制造工艺参数的优化[J]. 大连理工大学学报, 2002, **42**(4):446-450.
- ZOU Guo-lin, GUO Dong-ming, JIA Zhen-yuan, et al. Research on process parameter optimization of fused deposition modeling [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2002, **42**(4):446-450. (in Chinese)
- [14] 朱良均. 捣固炼焦技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- ZHU Liang-jun. **Stamp Coking Technique** [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992. (in Chinese)
- [15] 孙海忠, 张卫. 服从分数组数 Kelvin 本构模型的粘弹性阻尼器的阻尼性能分析及试验研究[J]. 振动工程学报, 2008, **21**(1):48-53.
- SUN Hai-zhong, ZHANG Wei. Analysis and experiment on damping properties of visco-elastic damper modeled by fractional Kelvin method [J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2008, **21**(1):48-53. (in Chinese)

## Orthogonal simulation test for choosing stamping coal cake design parameters

WANG Jian-song, WANG Dian-long\*, CAO Xu-yang, ZHANG Yan

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The design parameters, such as stamper weight, stamper lifting height and number of stampers, are radical in the design of stamp-charging coking related devices. However, the parameters are now usually chosen empirically but not supported theoretically. To solve the problem, by the use of DKM constitutive relation, an orthogonal simulation test on the process of stamping coal cake is raised, in which stamping efficiency and stamping work are taken as targets. Then, the orthogonal simulation results are analyzed and a series of reasonable design parameters are given. The test provides a new method for choosing stamping coal cake parameters and a new way for the design of related devices.

**Key words:** stamping coal cake design parameters; orthogonal test; simulation