DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.009

煤饼与捣固装置耦合非线性有限元分析 及煤箱结构优化^{*}

元利昆¹, 左 强², 孙乃鑫², 宁晓斌^{1*}

(1. 浙江工业大学 机械工程学院,浙江 杭州 310014;2. 太原重工股份有限公司 技术中心,山西 太原 030024)

摘要:针对捣固炼焦设备在作业时存在的问题,对捣固炼焦设备的捣固工作装置进行了研究。对国内外相关研究进行了归纳,确立了利用 Duncan-Chang 模型作为捣固炼焦中煤饼的本构模型的方法,通过实验装置获得了煤饼与煤箱之间的作用力分布,利用实验与仿真数据对比的方法,对煤饼本构模型及捣固动力学模型进行了验证,利用有限元的方法建立了模拟大型捣固炼焦 设备捣固过程的动力学模型,通过对煤箱结构特性的分析,对煤箱结构进行了尺寸优化设计。研究结果表明:利用 Duncan-Chang 模型模拟煤饼的本构从而开发的动力学模型,可以较为精确模拟设备的实际捣固过程;进行尺寸优化后的煤箱结构可以满足实际作业时的强度及刚度要求,且设备的质量更轻,有着良好的经济性。 关键词:结构;煤饼本构;有限元;优化

中图分类号: TH122; TD402 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1127-06

Briquette-stamping device coupling nonlinear analysis by finite element method and coal box structure optimization

YUAN Li-kun¹, ZUO Qiang², SUN Nai-xing², NING Xiao-bin¹

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;2. Technology Center, Taiyuan Heavy Industry Co.Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the problems of tamping coking equipment during operation, the working device of tamping coking equipment was studied. The related researchs at home and abroad were summarized, the method of using the Duncan-Chang model as the constitutive model of stamping coking briquette was established. The tamping experiment was carried out to obtain the distribution of the force between the briquette and box. The constitutive model of briquette and tamping dynamic model were verified with the method of comparison between experimental data and simulation data. Dynamic simulation model for the process that large tamping equipment tamped briquette was set up in finite element method. The size optimization of box structure was designed through the analysis of the box structure characteristics. The results indicate that the auther used the Duncan-Chang model to simulate the constitutive model of briquette, then devolop the dynamic model to simulate the real stamping process accurately. The size-optimized structure of coal box, with less mass and high economic efficiency, can meet the requirements during the real operation. **Key words:** structure; briquette constitutive; finite element; optimization

0 引 言

国内对5.5m捣固装煤车进行了实验、有限元研究,

结合结构振动分析及实验研究,得出了装煤车平台的振动规律^[1],对煤仓仓壁、煤槽内壁进行压力试验与校验分析^[2-3];鉴于煤饼与岩土材料的相似性,借鉴岩土模

收稿日期: 2017-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375452)

作者简介:元利昆(1992-),男,江西抚州人,硕士,主要从事工程机械结构分析方面的研究。 E-mail: 781788725@qq.com 通信联系人:宁晓斌,男,副教授,硕士生导师。E-mail: nxb@zjut.edu.cn

型设计了煤饼的 Duncan-Chang 本构模型^[4-6],得到可以 用于有限元计算的捣固锤-煤饼模型:对不同性状煤饼 进行参数的拟合,得到影响煤饼捣固过程中起关键性作 用的性能参数,并实现了连续捣固的动力学仿真^[7];探 索了工艺参数对捣固煤饼的影响,对捣固工艺参数进行 了优化设计^[8]。WANG J S 等人^[9]通过实验测得了煤粉 不同高度对煤箱侧壁载荷的作用规律:KUYUMCUHZ 等人[10-15]通过实验室模型实验,研究煤饼捣固过程在特 定配煤比下弹塑性规律,提出了"捣固能力"的概念,得 出煤饼的表面水分、煤料粒度、力学性能对煤饼的捣固 能力有着显著的影响;利用离散单元法研究了煤饼在捣 固过程粒子状态;针对捣固煤饼设计了一系列的实验装 置,进行煤饼性能及动力学过程模拟的研究。以上研究 或基于捣固锤与煤饼的动力学分析,或研究煤饼的力学 性能研究,而实际工作时,捣固锤、煤饼、煤箱为一体 相互发生作用。

本研究首先建立与煤箱结构相似的实验装置,进行 相关实验数据的采集,建立捣固锤-煤饼-煤箱结构一体 化有限元模型,以 6.25 m 大型捣固装煤车煤箱结构为 对象,研究实际煤箱结构的应力及位移分析结果,并基 于分析结果对结构实现优化设计。

1 捣固实验与捣固过程有限元瞬态分析

1.1 捣固实验

捣固过程即煤粉夯实成煤饼的过程,是捣固锤、煤 饼、煤箱相互作用的非线性动力学过程。本研究设计一 个捣固锤、煤箱装置进行捣固实验。选用电阻应变片式 压力传感器,粘贴于煤箱侧壁,获取煤箱侧壁的载荷。 采用煤粉作为捣固介质,工程中煤饼捣固后的最终密度 为1.050 g/cm³,对实验用煤饼进行预捣固,得到煤饼密 度为1.048 g/cm³。捣固实验过程流程图如图1所示。



图 1 捣固实验流程图

数据采集及处理采用 DH5922 动态信号测试分析

系统,按照全桥方式连接压力传感器的引线与信号采集器的接线端口,设置各项参数,数据采集前对传感器进行平衡、清除零点、初始化硬件以消除初始传感器误差。进行捣固实验操作得到煤箱在煤饼不同高度下在不同位置捣固锤捣固的载荷数据。

某测点记录的压力曲线如图 2 所示。



图 2 某测点第三次捣固压力实时曲线

实验煤箱三维模型及压力传感器布置如图 3、图 4 所示。



图 4 传感器分布示意图

以煤饼高度为 250 mm 时中间锤捣固为例, 捣固锤 从煤饼上方 200 mm 处自由落体, 采集的压力最大值数 据如表1所示。

衣1 床相即刀位直处传感品取入供数				
传感器序号	传感器数值με			
1	153.4			
2	186.5			
3	222.0			
4	213.4			
5	226.3			
6	426.9			
7	568.2			
8	580.3			

佐如八片黑丛生成黑目

图 4 中圆圈形状代表传感器布置位置,其中表 1 中传感器序号与图4中序号相对应。

传感器压力的计算公式为:

$$P = \mu \varepsilon k \tag{1}$$

式中: P—压力值, kPa; $\mu \varepsilon$ —传感器收集的应变量; k---率定系数,由传感器厂商提供,本研究中压力传感 器率定系数 k 的值为 0.085 238。

本研究通过传感器收集的数据,得到加载于煤箱载 荷分布及数值。

1.2 实验煤箱有限元瞬态分析

笔者在 Hypermesh 软件中煤箱进行有限元分析前 处理,并将其导入 Abaqus 求解器中。由于模型涉及到 多组接触,应力传递复杂,笔者选择一阶单元作为模型 单元类型;煤饼与捣固锤的建模在 Abaqus 软件中完成。 煤饼是一种复杂的非线性材料,因此建模时建立合适的 本构关系是建模的关键。本研究通过 Duncan-Chang 模 型,利用煤饼材料实验参数,在 Abaqus 中建立煤饼模 型。在 Abaqus 中定义煤饼与煤箱的接触,分别定义法 向和切向摩擦接触; 捣固锤与煤饼之间的接触, 只定义 法向接触。煤粉类似岩土材料,其自身堆积会产生地应 力,地应力对仿真结果会有较大的影响,因此创建地应 力平衡载荷步用于煤饼结构自身的地应力平衡, 创建隐 式动力学载荷步用于非线性动力学仿真。

本研究建立煤饼在 150 mm、200 mm、250 mm 等 不同高度下的有限元模型,由于煤箱模型为对称结构, 只建立 1/2 煤箱有限元模型,采用镜像得到另外一半煤 箱结构。以煤饼高度为 250 mm 中间锤捣固工况为例建 立有限元模型及约束示意图如图5所示。

捣固锤每次从煤饼上方200mm处做自由落体捣固 煤饼,进行有限元瞬态分析,得出捣固锤对各组煤饼高 度作用下的煤箱应力及位移结果。



图 5 实验煤箱有限元模型

1-捣固锤; 2-煤饼; 3-煤箱模型; 对煤箱及煤饼端侧 (区域 5) 施加 X 轴方向的约束, 对煤箱及煤饼底部(区域 6) 施加 Y 轴方向的约束, 对煤箱受力支撑板 (区域 4) 施加 Z 轴方向约束, 对煤饼及锤镜像对称面(区域 7) 施加关于 XY 平面对称约束, 对煤饼、锤、煤箱施加重力载荷

本研究建立图5煤箱有限元模型,结合实验所得表 1 及图 4 将载荷转化为压力, 施加于煤箱侧壁上, 添加 同样边界条件,得到煤箱结构应力及变形。实验采集压 力载荷数据加载至煤箱后的最大位移云图如图 6(a) 所示,建立实验煤箱-煤-锤有限元模型瞬态分析最大 位移云图如图 6(b) 所示。



由图 6 可知 (应力云图未给出),煤箱在实验载荷 作用下及通过实验煤箱-煤-锤有限元模型得出煤箱最 大变形 (应力) 区域及数值大小一致,最大变形 (应力)

当煤饼高度为 250 mm, 捣固锤自由落体捣固煤 饼,实验锤-煤-煤箱有限元模型瞬态分析,最大应力 节点的应力-时间曲线对比如图 7 所示。



图 7 最大应力节点的应力-时间曲线对比

图 7 中实线为煤箱最大应力节点应力-时间曲 线; 当煤饼高度为 250 mm, 捣固锤自由落体捣固煤 饼,煤箱有限元模型加载实验载荷,图7中虚线为煤箱 最大应力节点应力-时间曲线。

当煤饼高度为 250 mm, 捣固锤自由落体捣固煤 饼, 实验锤-煤-煤箱有限元模型瞬态分析, 最大位移 节点的应力-时间曲线对比如图 8 所示。



图 8 最大位移节点的应力-时间曲线对比

煤箱最大位移节点位移-时间曲线见图 8 实线; 当煤饼高度为 250 mm,捣固锤自由落体捣固煤饼, 煤箱有限元模型加载实验载荷,煤箱最大位移节点位移 -时间曲线见图 8 虚线。

本研究通过比较各煤饼高度在不同位置锤捣固的 分析结果认为,通过 Duncan-Chang 模型及煤饼实验参 数建立煤饼本构关系,建立捣固锤结构、煤饼、煤箱结 构一体化非线性有限元模型,进行煤箱结构动态捣固分 析是可行的。

2 大型捣固装煤车煤箱结构动力学分析

捣固装煤车煤箱(煤槽)作为捣固炼焦设备中直接 与煤饼接触的结构,其结构特性对煤饼的成型质量乃至 整个捣固炼焦设备的影响都是巨大的,因此研究捣固煤 饼时煤箱的动力学特性是非常有意义的。

本研究以 6.25 m 捣固装煤车煤箱为研究对象, 6.25 m 捣固装煤车整机重量 2 000 t,其中单侧煤箱重量 为 25.322 t。煤箱四部分合围组成一个长方形空间,煤 粉连续输送到长方形空间,长方形空间上方捣固锤自由 落体夯实煤粉,其中一侧的煤箱结构如图 9 所示,Y轴 方向为 16.045 m,Z方向为 6.145 m。



图 9 煤箱结构 1-槽钢; 2-煤箱侧壁; 3-工字钢; 4-支撑板

图 9 中的煤箱由侧壁钢板、槽钢、工字钢等组成, 侧壁钢板与煤饼直接接触,其余部分为支撑结构。实际 作业时捣固锤以 67 次/min 的频率对煤饼进行捣固,每 次提锤高度为 400 mm,单个捣固锤质量为 450 kg,共 34 个锤分为 0、90、120、180、240、270 这 6 个不同 相位进行捣固,其中 0 相位时有 10 个锤同时落下为其 最大载荷工况,因此以 0 相位 10 锤工况为主要研究工 况,对煤箱结构进行有限元动力学分析。

本研究建立 6.25 m 捣固装煤车捣固锤、煤饼、煤 箱一体化有限元模型,煤箱按照实际结构划分有限元网 格,添加约束、施加载荷,捣固锤-煤饼、煤饼-煤箱之 间添加接触,捣固锤从煤饼上方固定高度自由落体。

实际捣固过程中有着不同的工况,同时落下10个 锤时是其最危险工况,因此分析这一工况;煤粉是从 0.5 m高度开始捣固直到达到6.1 m高度,仿真建模从 煤饼高度750 mm开始,以500 mm为煤饼高度间隔, 直到煤饼高度达到5750 mm对煤箱进行结构分析,分 别得到煤箱在煤饼捣固动力学过程中应力和变形分析 结果。以煤饼高度为4750 mm时的瞬态分析为例,煤 箱应力云图如图10 所示。从图10可以看出,煤箱最大

位置基本重合。

应力在捣固锤附近的侧壁区域,第2、4、6、8锤(第 3、5、7、9锤及第1、10锤)捣固区域附近侧壁的应 力分布基本一致。



图 10 煤饼高度 4 750 mm 的煤箱应力云图

第2、4、6、8 捣固锤附近区域侧壁节点应力最大 值节点实时曲线如图 11 所示。



从图 11 中可以看出,各锤在其捣固作用区域内应 力数值及分布一致。研究结果表明,随着煤饼高度的 增加,煤箱应力先增大后减小再增大,到达一定高度 后,应力基本无变化;在煤饼高度为 3 500 mm~ 4 000 mm 范围内时,煤箱的应力最小,当煤饼高度在 4 750 mm~5 750 mm 时,煤箱应力最大。在各煤饼高度 捣固时,该煤饼高度下方 50 mm~150 mm 处的侧壁区 域为应力的最大区域。

3 煤箱结构尺寸优化

前一节对从 750 mm~5 750 mm 煤饼高度对应的煤 箱结构进行了瞬态分析,后处理分析发现 4 750 mm 煤 饼高度对应的煤箱应力及变形最大,为 38.62 MPa 和 1.24 mm,煤箱结构各部分的材料分别是侧壁 0Cr19Ni9, 其余部分为 Q235。根据材料的力学性能发现结构的强 度和刚度远满足于要求,结构存在轻量化的设计潜力以 达到减轻工作结构负载、节省成本等目的。

基于上述分析,本研究对煤箱结构进行优化设计。 优化设计的三要素为:设计变量、约束条件、优化目标。 由于煤箱的原结构及特点,笔者结合企业要求及实际加工要求,利用Hyperwork中Optistruct模块进行尺寸优化。

尺寸优化是通过改变结构单元的属性如壳单元的 厚度、梁单元的横截面属性、弹簧单元的刚度等以达到 一定的设计要求。

本研究在 Optistruct 模块中将煤箱侧壁、工字钢、 槽钢结构各部分厚度设置为设计变量,并定义其变量范 围;定义目标函数为煤箱各部件的质量最小化;对煤箱 模型进行边界条件设置,并定义对其的的约束(位移及 应力约束);设计变量及约束如表2所示(以工字钢、 槽钢腰厚及侧壁厚为例)。

表2 设计变量及设计约束

参数 变量	初始值 /mm	变量范围 /mm	应力约束 /MPa	位移约束 /mm
工字钢腰厚	5.2	4.8-5.2	50	2
槽钢腰厚	7.0	5.0-7.0	50	2
侧壁厚	20	15-20	50	2

通过提交计算,得到通过 Optistruct 模块得到的煤 箱优化后模型,其只是理论上的煤箱尺寸及结构,实际 生产加工中,钢材规格有其国家标准,根据国家标准进 行选型,重建煤箱结构并对其进行有限元分析。

根据优化结果重新选型构成的新煤箱结构应力云 图如图 12 所示。



图 12 选型优化后应力云图

优化前后煤箱各项参数对比表如表3所示。

表3 煤箱优化前后数值对比

煤箱	工字钢规 格/GB	槽钢规格 /GB	侧壁壁厚 /mm	最大应力 /MPa	最大位移 /mm
原结构	热轧轻型 20#	热轧轻型 20#a	20	38.62	1.240
优化后	热轧普型 14#	热轧普型 14#a	16	92.69	2.016

由表 3 中可以看到煤箱优化后工字钢、槽钢及侧壁 的各项尺寸均有所减小。优化后煤箱质量由 25.322 t 减 至 17.856 t,减重比达到 29%。优化后的煤箱结构,受 力的分配也更加合理,充分发挥材料的潜力,有着更好 的经济性。

4 结束语

本研究建立捣固实验装置,进行捣固实验研究,得 出煤箱压力分布;建立捣固锤结构、煤饼、煤箱结构有 限元一体化模型,进行捣固锤夯实煤饼有限元瞬态分 析,获得了煤饼与煤箱之间作用力分布情况,实验与有 限元得出的煤箱载荷,造成的煤箱应力、变形基本一致, 表明捣固锤结构、煤饼、煤箱结构非线性有限元模型, 准确反映了捣固动力学过程。

本研究采用捣固锤结构、煤饼、煤箱结构非线性有限元模型,对引进的 6.25 m 捣固炼焦煤箱,进行捣固 过程瞬态分析,并对煤箱进行结构尺寸优化,对大型捣 固焦炉设计及制造提供了一定的参考价值。

参考文献

- 张 珂. 5.5米捣固装煤车的结构振动分析与实验研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 215-217.
- [2] 郭吉坦, 钟蓓. 5.5 m 捣固装煤车煤槽内壁压力试验与校 验分析[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(5): 21-24.
- [3] 刘定华. 大型煤仓仓壁侧压力的试验研究[J]. 煤矿设计, 1995(1): 35-38.
- [4] 费 康, 张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M]. 北 京: 中国水利水电出版社. 2010.
- [5] 徐远杰, 王观琪, 李 建, 等. 在 ABAQUS 开发实现 Duncan-Chang 本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1032-1036.

- [6] 肖玉辉. 煤饼捣固的材料非线性动力学仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2011.
- [7] 郭 林. 连续冲击载荷作用下捣固煤饼的动力压实研究 [D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2012.
- [8] 张 岩. 基于正交试验法的煤饼捣固工艺参数优化[D]. 大连: 大连理工大学机械工程学院, 2013.
- [9] WANG J S, WANG D L, GAO S D, el. Research on stamp charging car coal box pressure trough field test[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2013, 40(7): 528-533.
- [10] ABEL F, ROSENKRANZ J, KUYUMCU H Z. Stamped coal cakes in cokemaking technology: Part1-a parameter study on stampability[J]. Ironmaking Steelmaking, 2009, 36(5):321-326.
- [11] ABEL F, ROSENKRANZ J, KUYUMCU H Z. Stamped coal cakes in cokemaking technology: Part2-the investigations of cake stampability[J]. Ironmaking Steelmaking, 2009, 36(5): 327-332.
- [12] SAND A, ROSENKRANZ J, KUYUMCU H Z. Modelling and simulation of stamp-charged coke making by 2-D discrete element method[J]. Advanced Power Technology, 2013, 24(6): 1039-1047.
- [13] KUYUMCU H Z, SANDER S. Stamped and pressed coal cakes for carbonisation in by-product and heat-recovery coke ovens[J]. Fuel, 2014, 121(2): 48–56.
- [14] KUMAP P P, VINOO D S, YADAV U S, et al. Optimization of coal blend and bulk density for coke ovens by vibrocompacting technique non-recovery ovens[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2007, 34(5): 431-436.
- [15] REJDAK M, WASIELEWSKI R. Mechanical compaction of coking coals for carbonization in stamp-charging coke oven batteries[J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2015, 51(1): 151-161.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

YUAN Li-kun, ZUO Qiang, SUN Nai-xing, et al. Briquette-stamping device coupling nonlinear analysis by finite element method and coal box structure optimization [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1127-1132. 《机电工程》杂志: http://www.meem.com.cn

元利昆, 左 强, 孙乃鑫, 等. 煤饼与捣固装置耦合非线性有限元分析及煤箱结构优化[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1127-1132.