

颗粒流撞击壁面的离散元模拟*

沈文君, 袁 健

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310032)

摘要:为了解决催化裂化装置中催化剂颗粒的磨损、撞碎等问题,首要解决催化剂颗粒的运动特性问题,为此将离散元数值模拟的技术应用到催化剂颗粒撞击壁面的模型中,简化了催化剂颗粒撞击壁面的模型为颗粒流撞击壁面模型,开展了颗粒流撞击壁面的离散元分析;建立了颗粒流中随机标记颗粒的速度与时间、位移与时间的关系,及整个颗粒流的动能与时间的关系;追踪了标记颗粒的运动轨迹,解释了颗粒流撞击壁面产生不规则分布的原因;提出了分段区间随机取样求得壁面平均应力的方法,在不同入射速度下对壁面产生的平均应力大小进行了对比分析。研究结果表明,入射颗粒流的速度对壁面应力的影响呈不稳定性,不同的入射速度影响壁面的平均应力大小,且在一定范围内入射速度越大,壁面的应力越大。

关键词:催化裂化装置;颗粒流撞击;离散元数值模拟

中图分类号: TQ460.35;0242;TH117

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1247-04

Simulation of particle flow impact wall based on DEM

SHEN Wen-jun, YUAN Jian

(The MOE Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: In order to solve the problems of wear and tear of the catalyst particles, in catalytic cracking unit the first thing is to solve the problem of particle's motion feature, the numerical simulation method of discrete element method (DEM) was applied to the catalyst particles impinging wall model. The model of the catalyst particles impinging on the wall surface was simplified as the particle flow impinging wall model. The discrete element analysis of particle flow impinging on the wall surface was carried out. The relation between velocity and time, displacement and time, and relation between kinetic energy and time of particle flow was established. The marked particle's tracking was tracked. The reason for particle irregular distribution was explained. A method was presented to a random sample in subsection interzone seek to wall's average stress. Different incident speed of the effect of stress was compared and analyzed. The simulation results show that different incident speed has an unsteady influence on wall stress, different incident speed has an effect on the size of the wall stress and the bigger of incident speed, the bigger of wall stress in an certain range.

Key words: catalytic cracking unit; particle flow impact; discrete element method (DEM) numerical simulation

0 引 言

流化床反应器常采用直径 $20\ \mu\text{m} \sim 150\ \mu\text{m}$ 或更大粒径的微球催化剂^[1]。催化剂在催化裂化装置中都处于流化状态,通过气流的输送实现循环流动。由于这种流化床型的高操作流速和催化剂颗粒的大量循环,使得催化裂化装置中的许多构件均工作在高温(烟气)、大量固体颗粒不断冲刷环境下。对此,虽然

人们已采取了一些防范保护措施,但仍然不可避免地出现了很多问题,主要表现为:在系统循环过程中,由于催化剂颗粒流经一些部位时线速度过高会造成催化剂磨损,以及对构件和管壁的冲击与碰撞引起催化剂颗粒的撞碎,造成价格昂贵的催化剂大量跑损,不仅增加了生产成本,引起了环境污染;同时催化剂的颗粒损失还会导致装置的流化质量恶化,对工艺系统的流化性能、循环量以及损耗产生重大的影响。

收稿日期: 2012-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20876146)

作者简介: 沈文君(1987-),男,江西九江人,主要从事超精密加工与过程装配方面的研究. E-mail: shenwenjun1637@163.com

为了减少催化裂化过程中由于催化剂颗粒的跑损带来的损失,研究者们作了大量的研究,包括实验研究和数值模拟研究。其中,由于数值方法,相对实验方法有着周期短、成本低的优点,受到许多研究者的青睐。国内外一些学者对于颗粒撞击靶材的过程进行过研究,其中 Meguid 等^[2-3]利用有限元法模拟了单/多颗粒弹丸撞击工件产生的残余应力场;洪滔、王志伟^[4]对喷丸强化过程进行了有限元和离散元的模拟;袁巨龙^[5]对颗粒陷阱效应进行了颗粒流模拟。在其他方面也出现了对于颗粒流或者使用离散单元法模拟的研究^[6-10]。但是,针对于催化剂颗粒撞击构件的离散元模拟分析目前国内尚未见于报道。

本研究基于离散元的理论基础,使用 Itasca 公司的离散元软件 PFC/3D 对颗粒流撞击壁面的过程进行仿真,建立模拟颗粒流撞击壁面的三维离散元模型,模拟颗粒流撞击壁面的运动过程,以获得反射颗粒的运动特性,并用于研究反射颗粒反弹及其对颗粒流的影响。

1 离散单元法理论

颗粒介质在外力或内部应力状况变化时发生流动,会表现出来流体的性质,从而就构成了颗粒流。离散单元法认为颗粒为刚性体,颗粒之间的接触发生在很小的范围内,即为点接触。

在进行离散元数值计算时,研究者往往通过循环计算的方式,跟踪计算材料颗粒的移动状况^[11],其内部计算关系如图 1 所示。

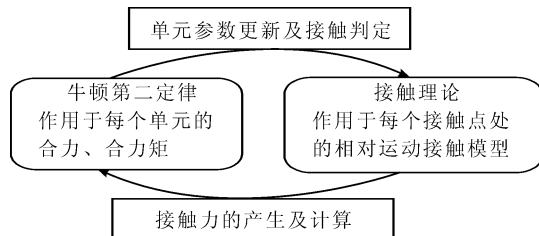


图 1 离散元循环计算方式

接触模型分为:刚度模型、滑动模型和粘结模型。刚度模型是在接触力和相对位移之间规定弹性关系,刚度模型包括线性刚度模型和 Hertz-Mindlin 接触模型。其中,Hertz-Mindlin 接触模型是一种非线性的描述,依据的是 Mindlin 和 Deresiewicz 在 1953 年提出的理论。它很好地解决了弹性体的接触问题。接触模型由相互接触两球体的以下两个参数来确定:剪切模量和泊松比。本研究采用非线性 Hertz-Mindlin 接触模型,即用 Hertz^[12]理论计算法向的受力,同时采用 Mindlin 理论计算切向作用;然后运用牛顿第二定律建立起单元的运动方程,通过接触理论和牛顿第二定律的循环来实现离散元数值计算。

2 数学模型建立及物理求解

为了对催化剂颗粒流撞击壁面运动的过程进行模拟,笔者首先建立起了撞击的数学模型。本研究分析了喷嘴喷射颗粒流垂直撞击壁面的情形。喷嘴以一定的速度喷出颗粒,流速范围在 12 m/s ~ 25 m/s,因而可将入射速度分为 12 m/s、16 m/s、20 m/s、24 m/s 共 4 个等级,分别研究不同入射速度对颗粒运动特性的影响。本研究将催化裂化装置中的壁面简化成 16 mm × 10 mm 的平面。催化剂颗粒被处理成直径为 20 μm ~ 150 μm 的球体,由 PFC 软件随机产生,以模拟催化裂化装置中颗粒的自由流化状态,从而能较好地贴近实际情况。

模拟所需模型参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

参数	数值	
最大计算颗粒数 N	1 200	
颗粒直径 $d/\mu\text{m}$	20 ~ 150	
颗粒密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 000	
剪切模量 G	颗粒	1e9
	壁面	1e9
泊松比 λ	颗粒	0.25
	壁面	0.25
摩擦因素 u	颗粒 - 颗粒	0.25
	颗粒 - 壁面	0.3

3 数值模拟与分析

3.1 颗粒流撞击壁面的直观模拟

对颗粒流撞击壁面进行仿真,影响结果的因素很多,包括颗粒形状、尺寸大小、接触模型选择及模型参数的选择,等等。本研究对不同入射速度参数对颗粒流垂直撞击壁面产生的应力进行数值模拟分析,对颗粒流撞击壁面进行数值运算。

颗粒流撞击壁面的一个瞬间如图 2 所示。

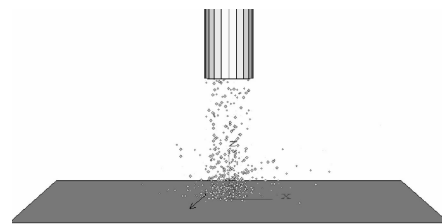


图 2 颗粒流撞击壁面的一个瞬间

图 2 中,颗粒流从与平面成 90°角的方向入射,与平面碰撞后速度、位移均发生了转变,且反射颗粒从整体来看以相反方向反弹开来,而且反弹颗粒较入射颗粒发生了部分的“扩散”现象,个别在边缘的颗粒的位置显得杂乱无章。

颗粒的碰撞细观过程放大后,分别如图 3、图 4 所示。为了跟踪颗粒的运动轨迹,能够清楚地观察颗粒的运动及撞击过程,本研究给颗粒流赋予特定的颜色,本次模拟中加上了浅色;再随意抽出一个颗粒作为观察对象,该颗粒由程序随机产生,代表颗粒中最普通的一颗粒,本研究给该颗粒赋予深色,将该颗粒作为标记颗粒,与此同时显示该颗粒的速度,在图中为黑色箭头。本研究将颗粒与颗粒之间的碰撞及颗粒与壁面的碰撞接触时产生的力定义为深色。

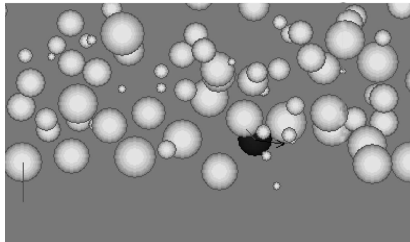


图 3 颗粒与颗粒碰撞的一个瞬间

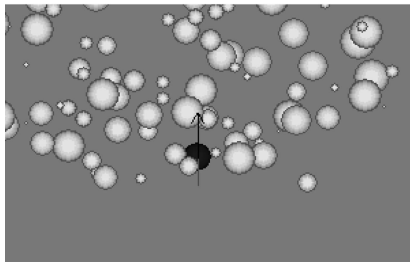


图 4 颗粒与壁面碰撞的一个瞬间

3.2 各参数之间的关系

为了更加准确地描述仿真模型,得出各参数之间的数学关系,本研究应用 PFC/3D 软件编制程序,得到各变量之间的联系。

3.2.1 标记颗粒的位移与时间、速度与时间之间的关系

入射速度 $v = -20 \text{ m/s}$,入射角度为与壁面垂直时,所标记颗粒的位移与时间、速度与时间的关系图分别如图 5、图 6 所示。

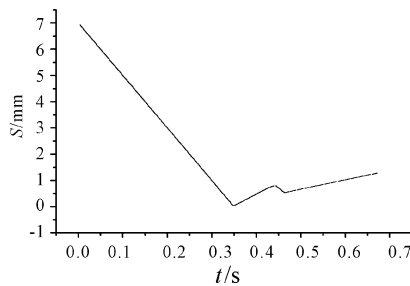


图 5 随机颗粒位移与时间的关系

图 6 中,该颗粒在 0.35 s 之前一直是以 -20 m/s 的速度运动,这也是标记颗粒的初始速度,说明颗粒在该时间之前并未与其他颗粒或是壁面碰撞;之后,速度曲线产生数次变化,说明该颗粒与壁面及颗粒之间发

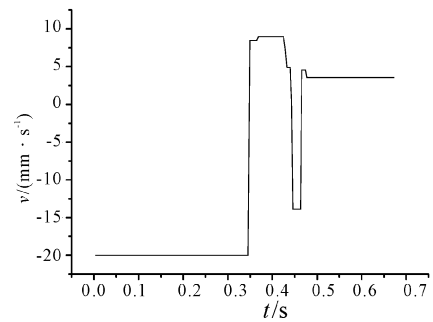


图 6 随机颗粒速度与时间的关系

生碰撞,因而改变了原来的运动方向。这种现象反映了在颗粒流撞击壁面的过程中,该颗粒不仅与壁面发生碰撞,还与别的颗粒之间也发生碰撞,而且碰撞之后颗粒返混到曾碰撞的颗粒流中,对其他颗粒流的运动产生影响。这就导致了颗粒流中反射颗粒产生逃逸扩散现象,在宏观上表现出了不规则分布现象。

3.2.2 颗粒流的动能与时间关系

前文从个体出发,追踪并分析了标记的单颗粒的位移、速度与时间的关系。而对于整个颗粒流的特性而言,还需从总体出发,从宏观角度去研究分析。为此,研究者通过对颗粒流的总体动能进行监测,可得动能与时间的关系,如图 7 所示。

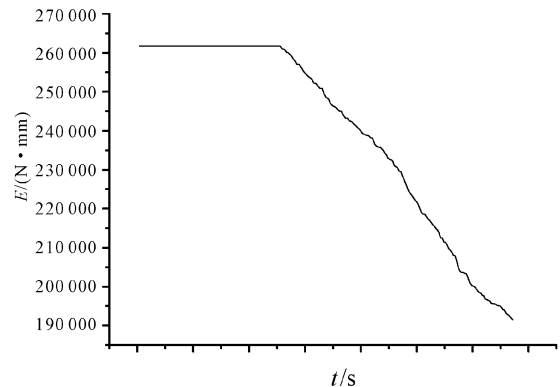


图 7 动能与时间之间的关系

图 7 中,在 $t = 0.25 \text{ s}$ 时刻前,整个颗粒流动能恒定不变,这是因为此时刻前颗粒的速度为初始速度,未发生变化,即 $E = mv^2/2$,故其动能恒定。但在 $t = 0.25 \text{ s}$ 时刻以后,颗粒流便与壁面发生碰撞,并由此而引发反射颗粒与入射颗粒之间的碰撞,这是导致之后颗粒流动能减少的根本原因。

3.2.3 接触应力与速度之间的关系

本研究采用应力计算公式,定义颗粒应力为:

$$\delta = F/S$$

式中: F —颗粒流碰撞壁面后在壁面产生的平衡力, S —受压面积。

当颗粒流以与壁面成 90° 垂直入射时, S 便为圆的

底面积。

$V = -12 \text{ m/s}$ 时壁面应力与时间关系如图 8 所示。

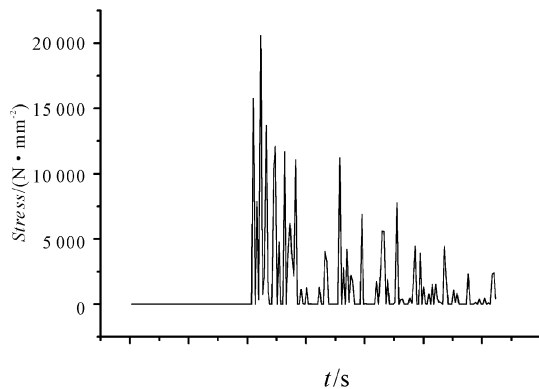


图 8 $V = -12 \text{ m/s}$ 时壁面应力与时间关系

图 8 中,随着时间的推移,应力皆有相对减小的趋势,这是由于前面的颗粒撞击壁面后反弹回来,与后续将要撞击壁面的颗粒流发生撞击,从而减缓了颗粒的质量流速,使得壁面应力有所下降。

此外还可看出,入射速度恒定时,应力与时间的关系并不稳定,产生“振荡”,这说明这种情况下应力不恒定,在颗粒流撞击的过程中,应力时高时低。这与某一时刻撞击壁面的颗粒数量、流速有关,而这也给本研究分析颗粒流的流速对应力影响带来麻烦。因此,为了更直观地观察应力与撞击速度之间的关系,本研究找出了每一入射速度下对应的平均应力,以比较入射速度对平均应力的影响。

本研究在计算平均应力时,采用分段区间随机取样求其平均值,而后求各区间的平均值的数学方法,即先将所有数据分成 m 个区间,每区间 n 个样本,则对第 j 个区间有 $\delta_j = (\sum_{i=1}^n \delta_i)/n$, 于是平均应力 $\bar{\delta} = (\sum_{j=1}^m \delta_j)/m$, 代入数据计算后可得到入射速度与平均应力之间的关系如表 2 所示。

表 2 入射速度与平均应力

入射速度 $V/(m \cdot s^{-1})$	平均应力 $\bar{\delta}/(N \cdot mm^{-2})$
-12	2.04×10^3
-16	3.19×10^3
-20	4.02×10^3
-24	5.70×10^3

从表 2 中可以看出,随着入射速度的增大,在整体看来其应力也随之增大,即: $\bar{\delta}_{v=12} < \bar{\delta}_{v=16} < \bar{\delta}_{v=20} < \bar{\delta}_{v=24}$, 这表明在入射速度为 $12 \text{ m/s} \sim 25 \text{ m/s}$ 的范围内,入射速度的大小对颗粒流撞击壁面的应力大小有很大影响,并且随着入射速度的增大,由颗粒流撞击壁面产生的应力也相应增大。

4 结束语

本研究应用离散单元法对颗粒流撞击壁面进行数值模拟,追踪了标记的单颗粒的运动,给出了该标记颗粒在不同时刻的位移、速度和分布情况,并从整体出发监测了总体颗粒流动能与时间的关系,解释了颗粒流出现部分“扩散”及不规则分布的原因;而且对颗粒流以不同入射速度撞击壁面而产生的应力大小进行了对比分析,得出入射速度的大小对平均应力有重要影响。观察到的结果显示:随着时间的推移,后续颗粒撞击壁面产生的应力较前面入射颗粒有减小的趋势,说明反射颗粒返混颗粒流对后续入射颗粒流的质量流有减缓作用。

本研究通过应用离散单元法可以形象地模拟随机产生的颗粒流与壁面碰撞的过程,它的整个过程犹如真实的实验一样,可以节省大量的人力物力。

参考文献 (References):

- [1] 朱洪法,刘丽芝. 石油化工催化剂基础知识[M]. 北京:中国石化出版社,2010.
- [2] MEGUID S A, KLAIR M S. An examination of the relevance of co-indentation studies to incomplete coverage in shot peening using the finite element method[J]. *Journal of Mechanics of Working Technology*, 1985(11):87-104.
- [3] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C, et al. Three-dimension dynamic finite element analysis of shot peening induced residual stress[J]. *Finite Element in Analysis and Design*, 1999(31):179-191.
- [4] 洪滔,王志伟,袁巨龙. 喷丸强化过程的有限元和离散元模拟[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(11):1321-1325.
- [5] 袁巨龙,王志伟,钱苗,等. 半固着磨具“陷阱”效应的颗粒流模拟[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(6):714-718.
- [6] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- [7] 张勇,金保升,钟文琪,等. 喷动流化床颗粒混合特性的三维直接数值模拟[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(2):33-37.
- [8] POTYONDYA D O, CUNDALL P A. Abonded-particle model for rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41(10):1329-1364.
- [9] TSUJI Y, KAWAGUCHI T, TANAKA T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed[J]. *Powder Technology*, 1993, 77(1):79-87.
- [10] 徐泳, KAFUI K D, THORNTON C. 用颗粒离散元法模拟料仓卸料过程[J]. *农业工程学报*, 1999, 12(3):65-69.
- [11] JOHNSON K L. *Contact Mechanics*[M]. 北京:高等教育出版社,1992.
- [12] 刘安源,刘石,潘忠刚. 振动给料机中固体颗粒物料运动规律的数值研究[J]. *中国科学院研究生院学报*, 2002, 19(1):35-42.

[编辑:罗向阳]