

基于有限元法催化剂颗粒撞击壁面的数值模拟*

袁 健, 沈文君

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

摘要: 为解决催化裂化装置中的许多构件因为催化剂颗粒长期不断冲击而导致失效等问题,将有限元法应用到其模拟仿真中,分析了单颗催化剂颗粒参数(角度、速度、材料)对不同壁面材料的撞击而造成壁面磨损的影响,建立了催化剂颗粒撞击壁面的数值分析模型,研究了催化剂颗粒以不同的速度、撞击角度,以及不同的催化剂颗粒的材料撞击不同材料的壁面对壁面造成的影响,并分析了催化剂颗粒变形对壁面磨损的影响,根据计算的结果,对催化剂颗粒参数进行了优化控制,提出了减少催化剂颗粒变形和构件磨损的技术措施。研究表明,该方法能够使催化裂化装置长期安全稳定地运行。

关键词: 催化剂颗粒参数; 壁面磨损; 催化剂变形; 有限元法; 数值模拟

中图分类号: TE963; TH117 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1179-04

Numerical simulation of catalyst particles impacting onto a surface based on finite element method

YUAN Jian, SHENG Wen-jun

(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 many components of the catalytic cracking unit caused failure that in long-term continuous impact for the catalyst particles, the finite element method was applied to the simulation. It was analyzed that the effect of catalyst particles impact velocity, angle and material of erosive of different materials on the surface for the case of single catalyst particles impact and the effect of the surface. The numerical analysis model of catalyst particles impacting onto a surface was established. The catalysts particles with different speed, size, impact angle, and different catalyst particle materials impact onto a surface and influence of the surface were researched. The relationship between catalyst particles deformation and erosive of the surface was analyzed. The catalyst particles parameters were optimized. In order to reduce catalyst particles deformation and erosive of the surface, the technical measures were proposed. The results show that, the catalytic cracking unit can work on long-term safety and stability.

Key words: catalyst particles parameters; erosive of the surface; catalyst deformation; finite element method(FEM); numerical simulation

0 引 言

催化裂化装置是炼制石油的重要生产装置,而它的安全稳定运行关系着企业的经济效益。虽然在生产过程中采取了一些相应的措施,但是仍然出现了很多问题:一方面由于线速度过高,流经一些部位时造成催化剂的磨损及催化剂颗粒与催化裂化装置中的构件相撞而引起催化剂本身的变形或破碎,另一方面

由于长期的撞击造成催化裂化装置中的许多构件失效^[1],对催化裂化装置的长周期安全稳定运行带来威胁^[2-4],它是造成停工停产的主要原因之一,因此有必要研究提出减少催化剂和催化裂化装置破坏的措施,从而为企业带来更多的利益。为了使碰撞造成的催化剂颗粒和构件损耗更小,国内外的学者进行了相关方面的研究,其中,D.Griffin等^[5]利用有限元法模拟了多颗颗粒撞击对壁面造成的磨损;M. Junkar等^[6]模拟

收稿日期: 2012-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20876146)

作者简介: 袁 健(1987-),男,江西抚州人,主要从事精密与超精密加工方面的研究. E-mail:yuanjian0588@126.com

了单个颗粒撞击工件而造成工件的破坏;T.Hong等^[7]模拟了单颗喷丸撞击金属构件表面残留屈服应力的研究;凌祥等^[8]对单/多颗弹丸垂直撞击工件过程进行了三维有限元模拟;胡凯征等^[9]提出了喷丸成形数值模拟方法和工艺优化方案;这些数值模拟的研究都是把颗粒简化为刚性,并没有考虑撞击后造成颗粒的变形或破损对壁面磨损的影响。这样模拟颗粒撞击壁面,仍与实际工程应用有很大差异。

本研究建立基于有限元法的催化剂颗粒撞击壁面的数值模拟,运用单颗催化剂颗粒撞击靶材的三维有限元模型,研究催化剂颗粒参数对壁面磨损量的影响,分析催化剂颗粒参数对壁面的磨损影响及颗粒本身的变形,通过有限元的计算结果,提出减轻催化剂颗粒和壁面磨损的优化控制。

1 催化剂颗粒撞击壁面的有限元模拟

本研究利用有限元分析软件ABAQUS模拟催化剂颗粒撞击壁面的过程,发生撞击失效的参数为 ω ,且 $\omega > 1$ 。失效参数 ω 的定义如下:

$$\omega = \frac{\bar{\varepsilon}_0^p + \sum \Delta \bar{\varepsilon}^p}{\bar{\varepsilon}_f^p} \quad (1)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_0^p$ —初始的等效塑性应变, $\bar{\varepsilon}^p$ —等效的塑性应变增量, $\bar{\varepsilon}_f^p$ —失效应变。

失效应变 $\bar{\varepsilon}_f^p$ 由塑性应变率 $\dot{\varepsilon}^p$ 和压力偏应力的比率 p/q (p 是压应力, q 是Mises应力)决定。在分析中当等效塑性应变完全发生时,即发生失效;而剪切失效是发生在当撞到事先设定好的所有应力组成为零的点,并且这个点也发生失效时。本研究在ABAQUS软件中建立单颗催化剂连续撞击壁面的三维有限元模型。壁面是一个长 $L=3.5\text{ mm}$,宽 $W=2\text{ mm}$,高 $H=0.5\text{ mm}$ 的长方体,如图1所示。壁面的网格划分采用八节点块状减缩积分单元,为了使计算更加精确,被撞区域的网格细化且被撞区域的单元尺寸如图1所示,约束壁面底面的位移和旋转。

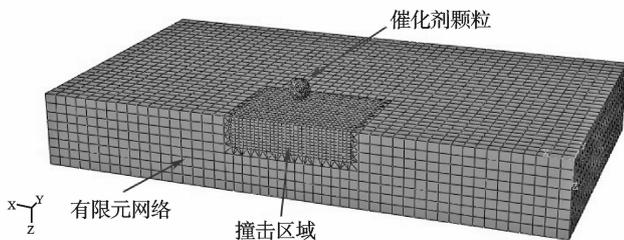


图1 催化剂颗粒撞击壁面的有限元模型

对于壁面,本研究选择3种材料,它的材料力学性能如表1所示^[10]。

表1 壁面的材料力学性能

力学性能	铝	铜	玻璃
弹性模量 E/GPa	65.8	138	74
泊松比 ν	0.3	0.3	0.22
密度 $\rho/(\text{kg m}^{-3})$	2 700	899	2 500
屈服应力 σ_y/MPa	148.4	279	-
拉伸强度 σ_t/MPa	-	-	75

催化剂颗粒的材料选用2种材料,其材料力学性能如表2所示。

表2 催化剂颗粒的材料力学性能

力学性能	镍	钢
弹性模量 E/GPa	210	203
泊松比 ν	0.31	0.3
密度 $\rho/(\text{kg m}^{-3})$	8 500	7 850
屈服应力 σ_y/MPa	59	-
拉伸强度 σ_t/MPa	-	-

通常催化剂颗粒为球状,因此研究者可以用球体来模拟催化剂颗粒,球体的直径 $d=0.1\text{ mm}$,与壁面的摩擦系数为0.2。根据催化剂颗粒和壁面的密度,可得出催化剂颗粒及撞击区域的质量分别为0.44 mg和0.379 mg。

2 有限元计算结果与分析

2.1 不同角度撞击的影响

催化剂颗粒以 $v=100\text{ m/s}$ 的速度撞击材料为铝的壁面,在直角坐标系中沿3个坐标轴的速度分量(如图2所示)为:

$$v_x = -v \cos \theta \quad (2)$$

$$v_y = 0 \quad (3)$$

$$v_z = -v \sin \theta \quad (4)$$

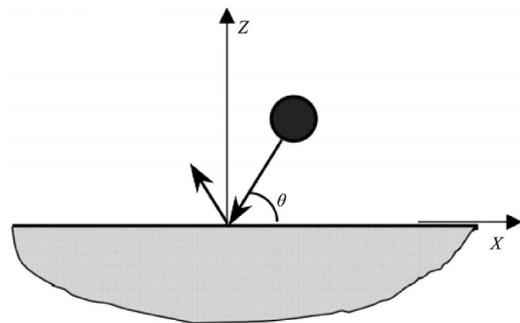


图2 催化剂以 θ 角度撞击

单颗催化剂颗粒分别以 30° 、 60° 、 90° 撞击材料为铝的壁面,壁面撞击后的情况,如图3所示。从图3中可以看出,催化剂颗粒撞击壁面后壁面和催化剂颗粒并没有发生损坏,只发生了变形且撞击角度为 90° 时壁面的变形最大,当催化剂颗粒以 30° 的角度撞击时壁面发生的变形最小。

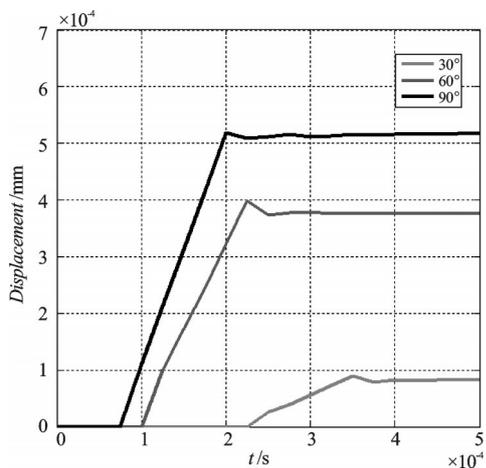


图3 催化剂颗粒以 $v = 100 \text{ m/s}$ 且 $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 撞击, 节点发生最大位移与时间的关系

2.2 撞击不同壁面材料的影响

壁面的材料分别为铝和铜,催化剂颗粒以 100 m/s 的速度和 90° 的撞击角度撞击壁面,壁面发生的最大变形位移与时间的关系,如图4所示,从图4中可以看出,当壁面的材料为铝时发生的变形量为壁面材料为铜时的0.5倍。而对于材料为玻璃,被撞击后发生了破碎,其示意图如图5所示。

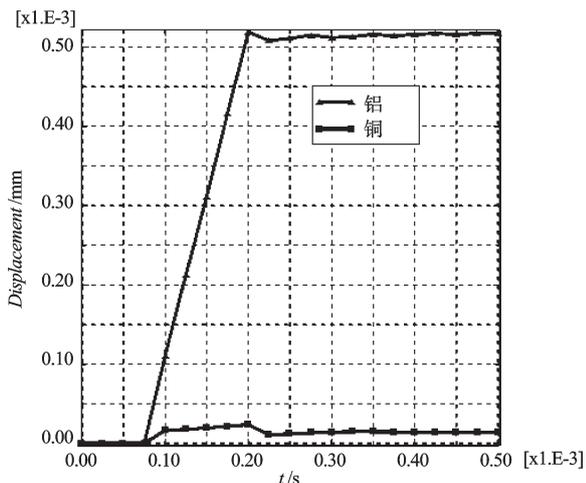


图4 发生最大变形节点的位移与时间关系

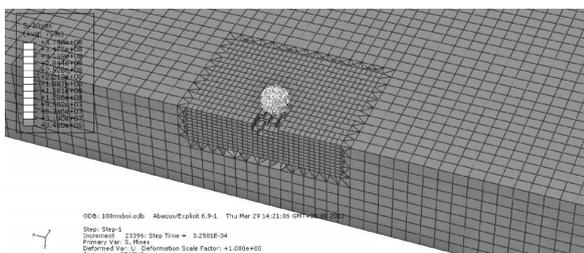


图5 材料为玻璃的壁面被撞后

2.3 不同速度撞击的影响

速度对壁面的影响,本研究只考虑在 90° 以不同的速度撞击材料为玻璃的壁面,速度分别为 $v = 75 \text{ m/s}, 100 \text{ m/s}, 125 \text{ m/s}$, 其分析示意图如图6所示。本研究

根据壁面的密度来计算壁面质量的损失,撞击区域的质量为 0.379 mg , 每个单元的质量为 $5.76 \times 10^{-5} \text{ mg}$, 撞击后的损失量按照失效单元的数量来计算,壁面撞击后磨损的情况,如图7所示。从图7中可以看出当催化剂颗粒以速度为 125 m/s 撞击时,壁面发生的破坏最大,和 Y.I.Oka 实验结果相似^[11]。

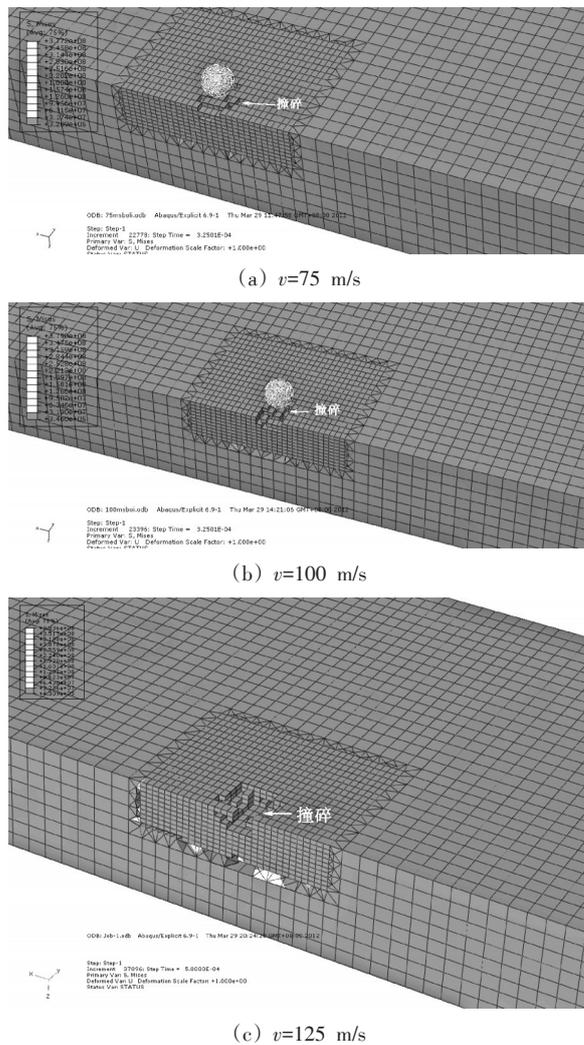


图6 不同速度撞击

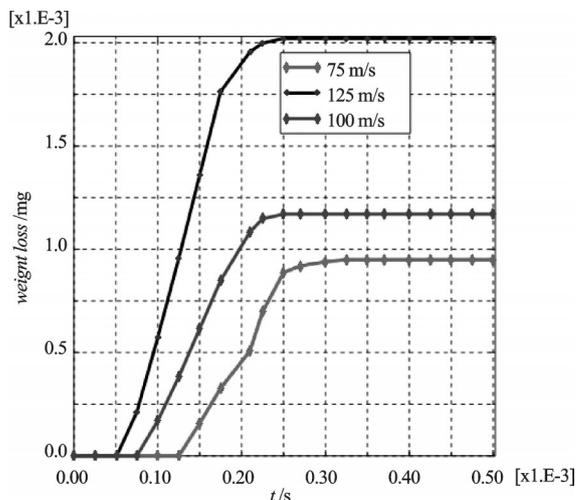


图7 撞击壁面的时间与磨损量关系

2.4 不同材料催化剂颗粒撞击的影响

不同材料的催化剂颗粒以 90° 和 $v=100\text{ m/s}$ 的速度撞击材料为铝的壁面,碰撞后的情况如图8所示。壁面被撞击后没有发生破坏,且发生的最大变形材料为铜的催化剂颗粒是材料为铝的0.3倍,撞击后壁面节点发生的最大位移如图8所示。

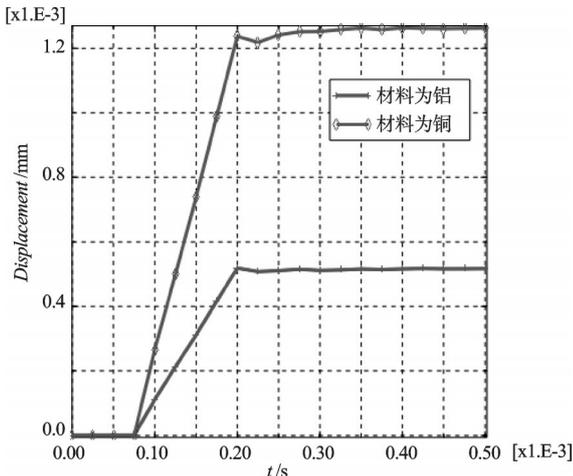


图8 壁面发生最大变形节点的位移与时间的关系

3 结束语

本研究应用有限元对催化剂颗粒撞击壁面进行了数值模拟,通过剪切和拉伸失效模型来计算磨损量(当有限元单元网格失效后将会被移除,损坏的信息和材料的移除将会被仿真),并且分析了催化剂颗粒变形对壁面损失的影响,根据有限元的计算结果,对于选择催化剂颗粒撞击的速度、角度和催化剂颗粒的材料有合理的依据,从而使壁面的磨损量达到最小。

最后,本研究根据模拟及优化的结果提出了减少催化剂颗粒磨损的控制措施,从而使催化裂化装置能够长期安全、稳定地运行。

参考文献(References):

- [1] 杨勇刚,罗 勇. 催化剂磨损和再生器催化剂跑损的控制[J]. 炼油设计,2001,31(9):15-18.
- [2] 刘仁桓,魏耀东. 催化裂化装置跑损催化剂的颗粒粒度分析[J]. 石油化工设备,2006,35(2):9-11.
- [3] 陈学东,王 冰,关卫和,等. 我国石化企业在用压力容器与管道使用现状和缺陷状况分析及失效预防对策[J]. 压力容器,2001,18(5):43-53.
- [4] 万古军,魏耀东,时铭显. 催化裂化再生器树枝状主风分布管磨损的气相流场分析[J]. 炼油技术与工程,2006,36(3):21-24.
- [5] GRIFFIN D, DAADBIN A, DATTA S. The development of a three-dimensional finite element model for solid particle erosion on alumina scale/MA956 substrate[J]. *Wear*, 2004, 256(9-10):900-906.
- [6] JUNKAR M, JURISEVIC B, FAJDIGA M, et al. Finite element analysis of single-particle impact in abrasive water jet machining[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006(32):1095-1112.
- [7] HONG T, OOI J Y, SHAW B A. A numerical study of the residual stress pattern from single shot impacting on a metallic component[J]. *Advances in Engineering Software*, 2008,39(9):743-756.
- [8] 凌 祥,彭薇薇,倪红芳. 喷丸三维残余应力场的有限元模拟[J]. 机械工程学报,2006,42(8):182-189.
- [9] 胡凯征,吴建军,王 涛,等. 基于温度场的喷丸成形数值模拟及参数优化[J]. 中国机械工程,2007,18(3):292-295.
- [10] ANDREWS E W, KIM K S. Threshold conditions for dynamic fragmentation of glass particles[J]. *Mechanics of Materials*, 1999(31):689-703.
- [11] OKA Y I, OHNOGI H, HOSOKAWA T, et al. The angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact [C]//11th International Conference on Wear of Materials, San Diego, CA, USA, 1997:573-579.

[编辑:张 翔]

(上接第1153页)

- [4] 曾 强. 基于多股则设备分配及工序排序的FISP多目标集成优化方法[J]. 计算机集成制造系统,2011,24(5):86-94.
- [5] 陈树中,韩正之,胡启迪. 线性系统控制理论[M]. 上海:华东师范大学出版社,2000.
- [6] 吴云峰. 面向设计与制造的数字化工厂平台[J]. 中国制造业信息化,2011,12(1):132-138.
- [7] 崔 剑. 服装企业的PLM客户需求信息模型[J]. 纺织学报,2010,31(4):132-138.
- [8] 刘江来. 数字化技术在工厂规划中的实际应用[J]. 建设机械技术与管理,2010(2):246-232.
- [9] 崔 剑. 面向大批量定值的NC加工智能化设计[J]. 机电

工程,2010,27(5):111-114.

- [10] 李 伟. 基于改进小生境遗传算法的Pareto多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制,2011,13(5):423-432.
- [11] CUI Jian. Research on Integration Technology for Product Lifecycle Management System [C]// The 6th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications. IEEE ISDA'06. Jinan: [s.n.], 2006:1109-1113.
- [12] DEB K. Multi-objective Optimization using Evolutionary Algorithms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [13] 崔 剑. PLM需求流动链结构模型及其决策控制研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学系, 2008.

[编辑:张 翔]