

废旧橡胶裂解物料运动和传热的模拟研究

尹凤福, 庄虔晓*, 徐衍辉, 张超, 田晓龙, 汪传生

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:分析裂解回转炉结构并建立废旧橡胶裂解物料颗粒(橡胶物料)运动的数学物理模型,得到回转炉体螺旋角、长度和转速对橡胶物料停留时间的影响公式及橡胶物料在回转炉中充分停留情况下处于滚落运动模式时炉体的理论转速范围;通过颗粒力学仿真软件(EDM软件)对橡胶物料在回转炉中的运动进行模拟,得到橡胶物料混合程度最佳的炉体转速;对比加入循环介质二氧化锆小球前后的橡胶物料运动状态,分析二氧化锆小球对橡胶物料运动和传热的影响;通过橡胶物料在300℃时的传热情况推断出废旧轮胎裂解过程中回转炉内顺丁橡胶的传热效果较好,其次是溴化丁基橡胶,天然橡胶和丁苯橡胶较差。

关键词:废旧橡胶;裂解;物料运动;传热;滚落运动模式;循环介质;EDM软件

中图分类号:TQ330.9;O241.82

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2020)11-0854-07

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.11.0854



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着经济的快速发展,橡胶工业已经成为我国经济的支撑行业,其年产值已过万亿元,其中轮胎年产值占比约为70%。我国轮胎产量约占世界总产量的40%,我国已经成为名副其实的橡胶工业大国,与此同时,废旧橡胶大量产生。据统计,2018年我国废旧橡胶产生量达到1 500万t以上,其中废旧轮胎产生量达到3.5亿条(1 270多万t),并且每年以8%~10%的速度递增,到2020年,我国废旧轮胎产生量预计达到2 000万t^[1-2]。大量废旧轮胎造成严重的黑色污染,引起国家高度重视,多种法律法规相继出台,对促进废旧轮胎资源化循环利用产业健康发展实施了若干举措,有效约束了废旧轮胎循环利用产业的恶性竞争,对建设资源节约型、环境友好型废旧轮胎综合利用产业和推动橡胶工业可持续发展等方面具有重要的意义。

废旧橡胶裂解作为废旧橡胶资源化利用的有效手段,可以将废旧轮胎转化为裂解油、炭黑、钢丝和可燃气等高附加值产品,在近几年受到广泛的关注。废旧橡胶裂解过程发生了复杂的物理和化学反应,包括废旧橡胶裂解物料颗粒(橡胶物

料)自身的运动、橡胶物料-橡胶物料和橡胶物料-炉壁之间的传热以及烃类大分子物质的转化等。而橡胶物料自身的运动和物质间的传热与裂解回转炉的结构参数和转速(n)密不可分,研究其关系对了解废旧橡胶裂解过程具有重要的意义^[3-6]。

本研究主要通过颗粒力学仿真软件(EDM软件)及有限元软件(Fluent软件)对裂解过程中的橡胶物料运动和传热进行了系统的研究,探究 n 和循环介质对裂解过程中橡胶物料运动过程的影响,并建立了相关的数学物理模型;探究不同种类橡胶在裂解过程中的传热效果,可为废旧橡胶裂解行业提供相关的指导。

1 模型建立

1.1 数学物理模型

1.1.1 橡胶物料轴向运动几何模型

工业用回转炉常采用小角度倾斜安装的方式^[7],进料口略高,排料口稍低,橡胶物料在自身重力作用下沿炉壁运动,使裂解产生的固体产物顺利排出。但倾斜安装时回转炉体的承重端负载以及启停时的冲击较大,本研究回转炉内炉壁存在螺旋钢圈,其旋向与炉体的转向一致,使橡胶物料从入口向出口运动,以避免倾斜安装造成的安全隐患。回转炉内螺旋钢圈分布如图1所示,其中 F_n 为螺旋钢圈对橡胶物料的支持力, G 为橡胶物料的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51875297);山东省自然科学基金重点资助项目(ZR2016XJ003)

作者简介:尹凤福(1969—),男,山东潍坊人,青岛科技大学教授,博士生导师,主要从事机电产品的绿色设计与制造以及材料的环保和循环利用技术研究。

*通信联系人(zqx_112@163.com)

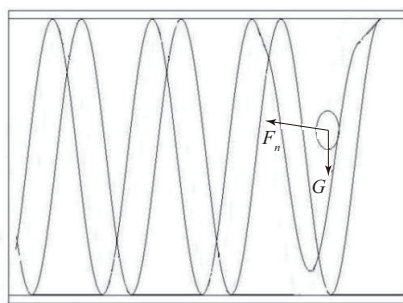


图1 回转炉内螺旋钢圈分布示意

重力。

1.1.2 橡胶物料停留时间 (T) 的计算公式

T 与橡胶物料轴向运动密切相关,是裂解过程的重要影响因素。 T 的计算公式为

$$T = \frac{\int_0^L dz}{u(z)} \quad (1)$$

式中, L 为回转炉体长度, $u(z)$ 为橡胶物料轴向速度。

假设橡胶物料沿炉壁底端螺旋运动到高处后滚落,周而复始不断向前运动,因此其沿斜面的运动速度(u_1)的计算公式为

$$u_1 = u_r \cos \varphi \quad (2)$$

式中, u_r 为橡胶物料径向速度, φ 为回转炉螺旋角。

u_r 的计算公式为

$$u_r = 2\pi n \int_0^{d/2} dr \quad (3)$$

式中, d 为橡胶物料直径, r 为橡胶物料回转半径。

综合式(1)~(3),可得 T 的计算公式为

$$T = \frac{\int_0^L dz}{2\pi n \cos^2 \varphi \int_0^{d/2} dr} \quad (4)$$

由式(4)可知: L 越大, n 越小, φ (小于 $\pi/4$)越大, T 越长。在 φ 不变的情况下, L 太大或者 n 过小,橡胶物料已完全裂解还未被输送到排料口,会造成能量的浪费;反之,橡胶物料还未完全裂解就被输送出排料口,则会导致其裂解过程不彻底。

1.2 离散元模型

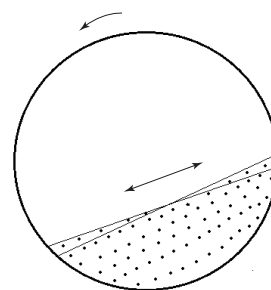
1.2.1 相关参数

利用EDEM软件建立回转炉内橡胶物料运动的离散元模型,自定义设置橡胶物料属性以及回转炉尺寸参数^[8-10]:炉体半径(R) 600 mm, L 1 850 mm,填充率 20%, d 20 mm。

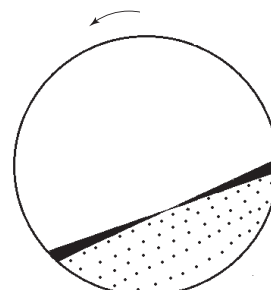
1.2.2 橡胶物料截面运动形式

橡胶物料在回转炉内的截面运动按 n 分为6

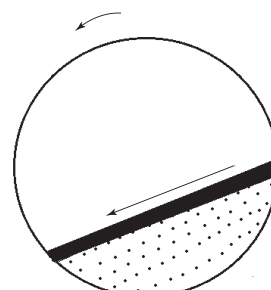
种模式:滑移运动模式(滑移模式)、塌落运动模式(塌落模式)和滚落运动模式(滚落模式),属于低速模式;泻落运动模式、抛落运动模式和离心运动模式,属于高速模式^[11]。由于一般工况的 n 较小,本研究只考虑橡胶物料低 n 下模式(见图2)。



(a) 滑移模式



(b) 塌落模式



(c) 滚落模式

图2 低 n 下橡胶物料的运动模式

滚落模式的橡胶物料显示出散体运动的特点,橡胶物料间连续性和混合较好,有利于橡胶物料间的传热,故滚落模式是本研究的最佳选择。在滚落模式下,橡胶物料截面运动分为两部分,位于橡胶物料下层内部、基本不发生相对运动的部分称为塞状流颗粒;位于橡胶物料上层区域、沿着橡胶物料倾斜截面作自由滑落运动的部分称为表

面活动层颗粒^[12]。

1.3 有限元模型

1.3.1 二维几何模型和网格划分

利用Fluent软件建立回转炉内橡胶物料运动的有限元模型。本研究模型比较规则且中心对称,网格质量选择粗糙,相关度等其他网格操作选择软件默认,自动划分后的回转炉网格如图3所示。

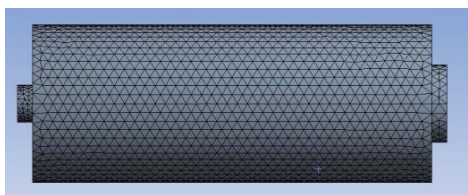


图3 回转炉网格划分

1.3.2 求解器设置

检查模型的网格质量,观察是否出现负体积等情况,保证网格单元的连通性;选择求解方法为Simple算法,时间类型设置为稳态计算。

1.3.3 粘度模型的选择

回转炉裂解属于慢速裂解工艺,橡胶物料在回转炉内流速较慢,流动模型选择为层流,不考虑气固两相间的热交换;传热类型为辐射放热类型,能量开关打开。

1.3.4 物性参数

流体类型设置为橡胶,由于数据库没有此类材料,需要新建4种流体类型橡胶材料,设定橡胶材料的物性参数如表1所示。

表1 橡胶材料的物性参数

参 数	天然橡胶	顺丁橡胶	丁苯橡胶	溴化丁基橡胶
密度/($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.960	0.910	1.020	0.950
比热容/[$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	1 995	1 890	1 970	1 875
传热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$]	0.180	0.195	0.190	0.090
粘度/($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	26.17	26.17	26.17	26.17

1.3.5 边界和初始条件

设置上下两个边界为转动类型,绕炉体中心轴匀速(n)旋转;设置上下两个边界为热交换壁面,设定温度值为300℃;将右侧橡胶物料入口设为速度入口,左侧气体出口设为压力出口;其余边界选择为不滑移壁面类型;打开残差监视器(流体

计算中,为了观察收敛情况的一个设置),初始温度设为25℃。

2 结果与讨论

2.1 橡胶物料运动模拟

2.1.1 n 的理论计算

本研究假设橡胶物料未发生反应,其颗粒类型与炭素相似。炭素颗粒在回转炉内发生滚落运动的最小转速($n_{\min}$)计算公式^[13]为

$$n_{\min} = \frac{60 \times (0.35\theta - 8.75\pi/180)}{\pi R \sin \Phi} \sqrt{gd \sin \theta} \quad (5)$$

式中: θ 为最大动态安息角,取 $\pi/4$; R 为600 mm; Φ 为余角,取0.739 rad; g 为重力加速度; d 为20 mm。将上述参数代入式(5),得到 $n_{\min}$ 为2.146 666 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

同理,炭素颗粒在回转炉内发生滚落运动的最大转速($n_{\max}$)计算公式^[13]为

$$n_{\max} = \frac{30}{\pi R} \sqrt{gd} \quad (6)$$

计算可得 $n_{\max}$ 为7.04 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

综上所述,橡胶物料保持滚落运动的合理 n 范围为2.14~7.04 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2.1.2 不同 n 下的橡胶物料截面运动模拟

为验证炭素颗粒发生滚落运动的 n 是否适用于橡胶物料,取 n 的中间值(4 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)和对照值(0.1和10 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)进行截面运动模拟,橡胶物料在3种 n 下运动5 s后的模拟结果如图4所示。

当 n 为0.1 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,橡胶物料间无速度梯度,仅仅在料床与炉壁间存在相对运动,橡胶物料近似为刚体缓慢运动,此时运动状态符合塌落模式;当 n 为4 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,橡胶物料间存在明显的速度梯度,橡胶物料截面运动分为两部分,上层区域表面活动层颗粒沿着斜面快速下滑,下层区域塞状流颗粒随炉壁缓速上移,属于典型的滚落模式;当 n 为10 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,上层区域表面活动层颗粒下滑速度快,中心处颗粒下滑速度低,运动状态接近于泻落运动模式。可知,炭素颗粒发生滚落运动的 n 适用于橡胶物料。

在滚落模式的不同 n (2~7 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)下进一步对橡胶物料进行截面运动模拟,其运动5 s后的模拟结果分别如图5所示。

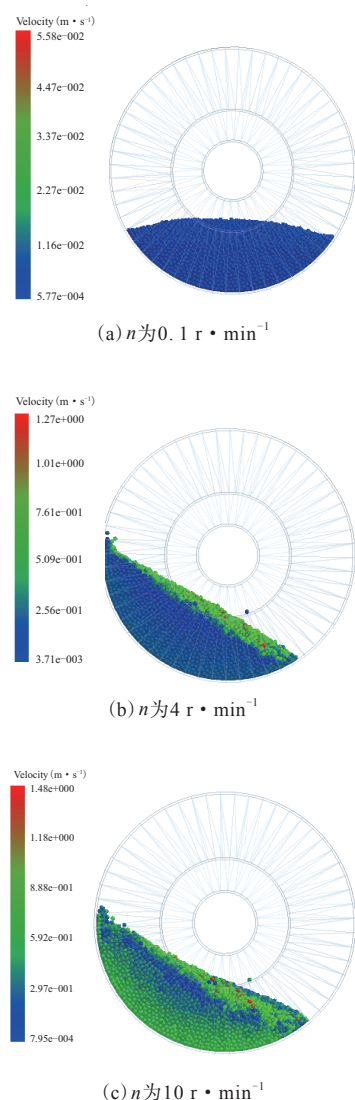


图4 不同 n 下橡胶物料的截面运动模拟

当 $n \geq 5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,会出现部分橡胶物料随炉壁上滑的情况,这是由于惯性作用和橡胶物料本身具有一定的粘度所导致的。考虑到工况条件下的设备误差等因素, n 为3或 $4 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 比较符合要求。由于滚落模式下 n 越大橡胶物料混合越好,选择最佳 n 为 $4 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ [14]。

2.1.3 加入循环介质的截面运动模拟

在最佳 n 下,橡胶物料中加入20%的循环介质二氧化锆小球(直径为30 mm),橡胶物料运动5 s后的截面运动模拟结果如图6所示。

从图6可以看出:加入二氧化锆小球后橡胶物料分层现象更加明显,橡胶物料间速度梯度变大,上层区域高速表面活动层颗粒所占比例增大,且

与下层区域塞状流颗粒混合程度加大,橡胶物料运动速度整体加快,但运动状态仍处于滚落模式;橡胶物料间运动速度加快和混合程度增高,热交换更加频繁,传热效果更好,这是因为二氧化锆作为优良的循环介质,其耐高温和耐磨特性使得它在裂解高温下不发生任何化学反应,加入二氧化锆小球,一方面可增大橡胶物料的传热面积,提高传热效率,另一方面,由式(5)可知,增大颗粒的 d 会使滚落模式的 $n_{\min}$ 增大,加快橡胶物料间的混合程度,改善其内部的受热情况。

2.2 橡胶物料传热模拟

2.2.1 单种橡胶物料在回转炉内截面传热模拟

假设单种橡胶物料为流体并充满回转炉内炉,在最佳 n 下4种橡胶物料在 300°C 时的截面传热模拟如图7所示。

由图7可知:橡胶物料温度由回转炉炉壁沿径向梯度递减,中心处橡胶物料传热条件差;顺丁橡胶物料温度最高,且径向温度梯度较小;溴化丁基橡胶物料在中心处传热稍差,天然橡胶和丁苯橡胶物料间传热性能较差,橡胶物料径向温度梯度较大。

2.2.2 单种橡胶物料在回转炉内轴向传热模拟

在最佳 n 下4种橡胶物料在 300°C 时的轴向传热模拟如图8所示。由图8可知:顺丁橡胶物料轴向温差无明显,整体受热更均匀;溴化丁基橡胶物料温度在速度入口处传热效果较好,压力出口处稍差;天然橡胶和丁苯橡胶物料温差较大,中心处橡胶物料传热条件较差。

综合考虑橡胶物料截面和轴向传热情况可以得出,在废旧轮胎裂解时,传热情况较好的顺丁橡胶和溴化丁基橡胶组分可能先达到裂解温度,天然橡胶和丁苯橡胶物料内部传热性能差,裂解过程会滞后一段时间,这与高聚物本身的大分子链结构有一定关系。

本研究成果在山东邹平的一家废旧轮胎裂解工厂得到应用,二氧化锆小球作循环介质以加强橡胶物料的传热效果得到了较好的验证。

3 结论

(1)建立橡胶物料轴向运动、截面运动以及 T 的数学物理模型,得到 T 的计算公式,明确了特殊设计的螺旋式回转炉体参数(L, φ 等)以及 n 对 T 的影响。

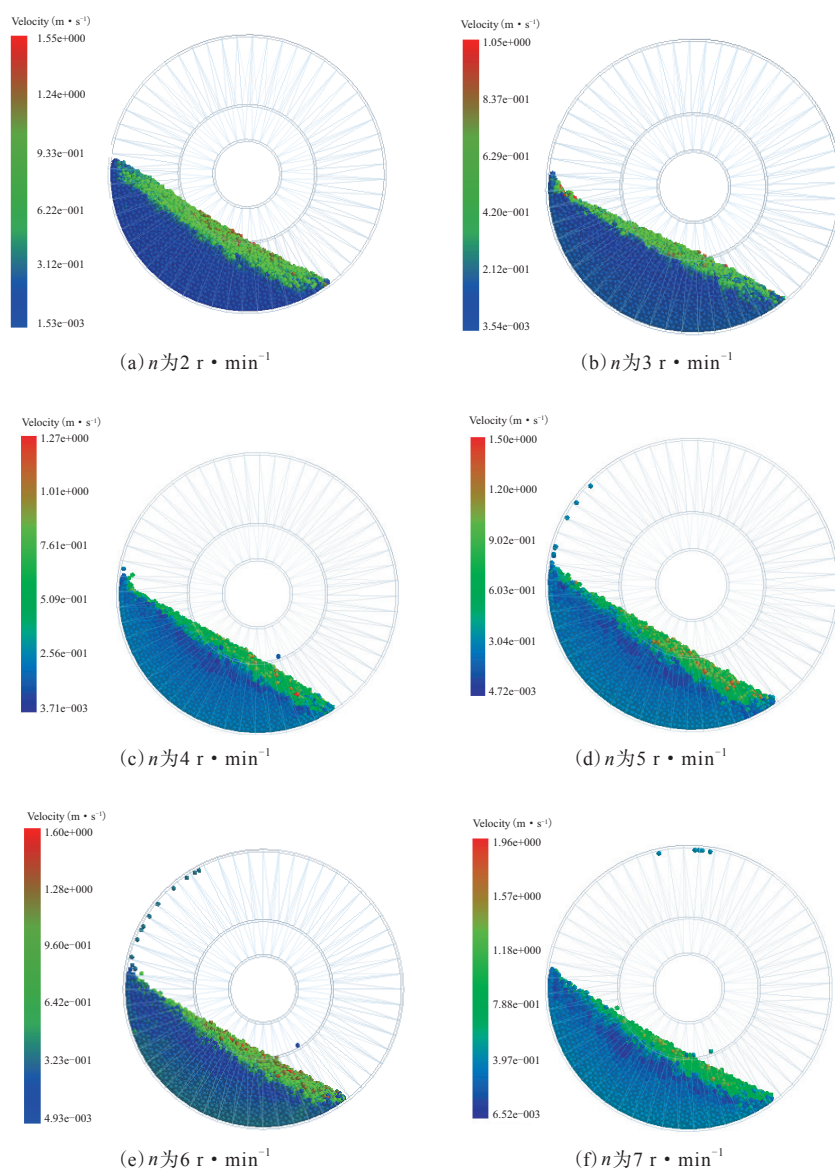
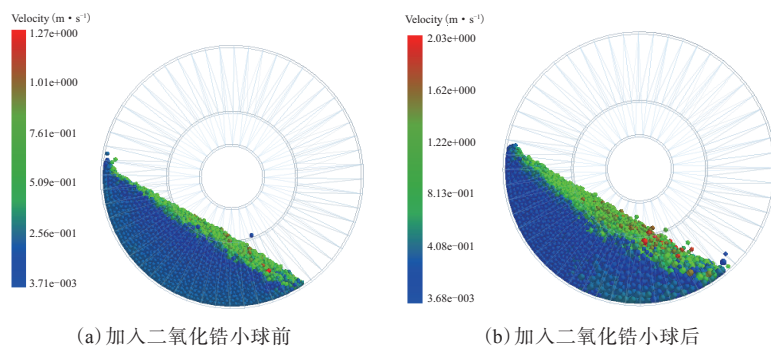
图5 不同 n 下橡胶物料的截面运动模拟

图6 加入二氧化锆小球前后橡胶物料的截面运动模拟

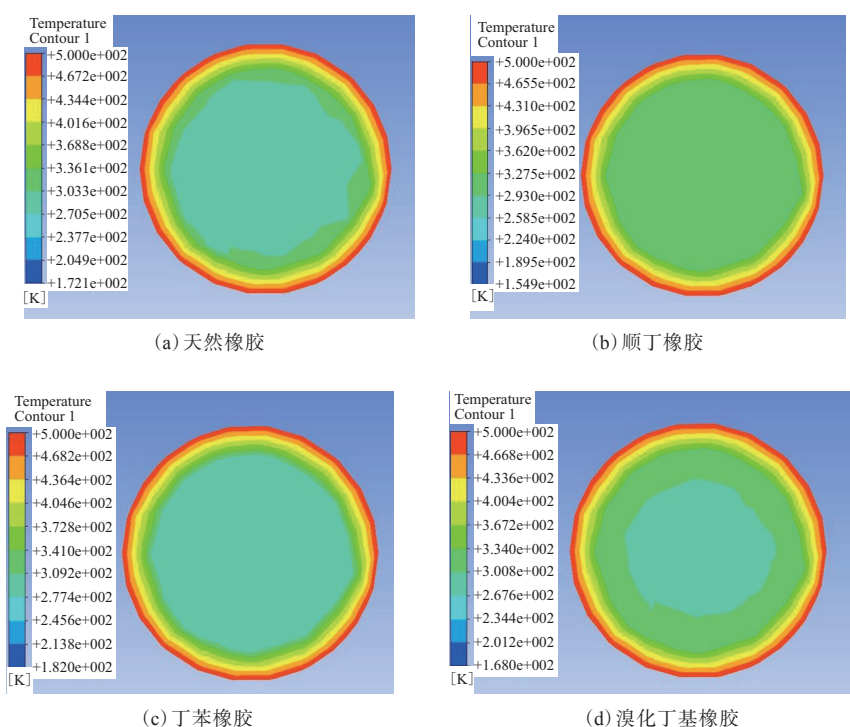


图7 橡胶物料的截面传热模拟

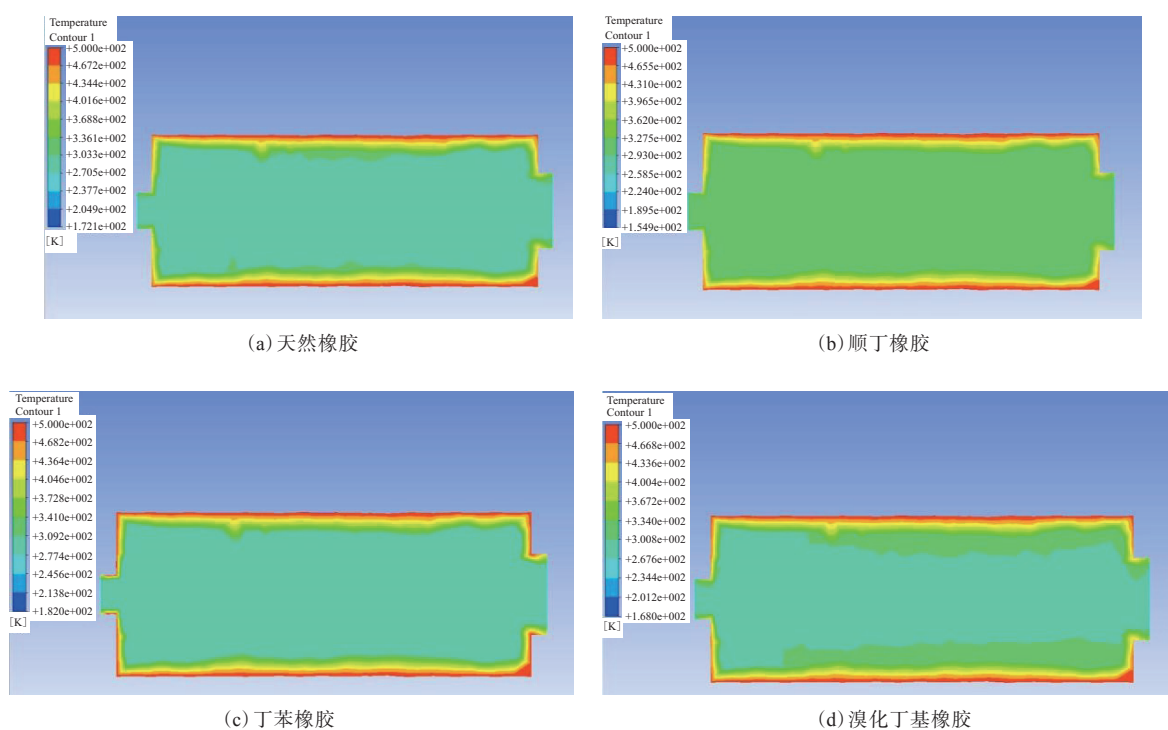


图8 橡胶物料的轴向传热模拟

(2) 计算橡胶物料在滚落模式下的理论临界转速 ($n_{\min}$ 和 $n_{\max}$), 并进行仿真模拟验证, 得到回转炉体合理 n 范围为 $2.14 \sim 7.04 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(3) 对符合滚落模式 n 范围内的不同 n 进行仿真模拟, 并考虑实际情况确定回转炉炉体的最佳 n 为 $4 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(4) 在滚落模式的最佳 n 条件下,模拟加入二氧化锆小球后橡胶物料的运动状态,橡胶物料间的运动速度明显增大,热交换频繁,传热更均匀、高效。

(5) 通过橡胶物料在300℃时的传热情况可以推断出,废旧轮胎裂解过程中回转炉内顺丁橡胶的传热效果较好,其次是溴化丁基橡胶,天然橡胶和丁苯橡胶较差。

参考文献:

- [1] 刘道春. 开辟废橡胶资源综合利用的蓝海[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2019(1): 37-45.
- [2] 谢忠设. 资本发力了,废橡胶利用能否迎来大发展[J]. 中国石油和化工, 2018(7): 34-36.
- [3] 弓洁, 薛四华, 袁仕远, 等. 橡胶物料在回转窑内的运动、传热与热解综合数学模型和模拟[J]. 江西建材, 2015(19): 257-258.
- [4] 张志霄. 废轮胎回转窑热裂解特性及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [5] Pershing D W, Lighty J S, Silcox G D, et al. Solid Waste Incineration in Rotary Kilns[J]. Combustion Science Technology, 1993, 93(1-6): 245.
- [6] 车凯. 回转窑内传热模型的建立及数值分析[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [7] 李晓光. 处理固体废物回转窑设计与数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [8] 张喆, 刘义伦, 赵先琼, 等. 外热式回转窑横截面内散体橡胶物料的传热特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(9): 2178-2183.
- [9] 张辉, 张永震. 颗粒力学仿真软件EDEM简要介绍[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2008(12): 48-49.
- [10] 胡国明. 离散元素法的工业应用于EDEM软件简介[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010, 34-35.
- [11] Henein H, Brimacombe J K, Watkinson A P. Experimental Study of Transverse Bed Motion in Rotary Kilns[J]. Metallurgical Transactions B, 1983, 14(2): 191-205.
- [12] 李勇. 回转窑内橡胶物料运动与传热特性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [13] 王春华, 陈文仲, 于国友, 等. 炭素回转窑转速的研究[J]. 轻金属, 2008(6): 45-47.
- [14] 徐衍辉. 废橡胶催化裂解过程中橡胶物料运动与传热模拟分析及实验研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.

收稿日期: 2020-05-26

Simulation Study on Material Movement and Heat Transfer in Waste Rubber Cracking Process

YIN Fengfu, ZHUANG Qianxiao, XU Yanhui, ZHANG Chao, TIAN Xiaolong, WANG Chuansheng

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The structure of pyrolysis rotary kiln was analyzed, and a mathematical model of movement of waste rubber cracking material particle (rubber material) was established. The formula for the influence of helix angle, length and rotation speed of the rotary kiln body on the residence time of the rubber materials was obtained, and the theoretical rotational speed range of the kiln body was obtained when the rubber material was in the rolling motion mode under full retention in the rotary kiln. The particle mechanics simulation software (EDEM software) was used to simulate the rubber material rotation in the kiln, the kiln body rotational speed with the best mixing degree of the rubber material was obtained. The influence of the zirconia ball as the recycling medium on the rubber material movement and heat transfer was analyzed by comparing the rubber material movement state. It could be inferred that the heat transferring effect of butadiene rubber in the rotary kiln at 300℃ was the best, followed by bromobutyl rubber, and the natural rubber and styrene-butadiene rubber were poor, during the waste rubber cracking process in the rotary kiln.

Key words: waste rubber; cracking; material movement; heat transfer; rolling motion mode; recycling medium; EDEM software