固定床及流化床中橡胶颗粒气固传热的研究

王晓新 袁修干
(北京航空航天大学 飞行器设计与应用力学系)

摘 要：从分析固定床中的径向导热系数出发，对各参数对径向导热系数的影响进行了深入的分析. 结果表明，为降低橡胶颗粒低导热率对气固传热性能的不利影响，必须运用固定床的后一个发展阶段即流化床来完成气固间的换热过程. 对传热关系式的分析表明，振动流化床中气固传热受振动强度的影响更大. 同普通流化床相比，在达到相同的传热效果的情况下，振动流化床可以较大幅度地降低气流的速度，具有节能的效果.

关 键 词：固定床；流化床堆；传热
中图分类号：TQ 051.1
文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2000)04-0408-04

如今，环境污染已成为公害. 除了氟利昂向大气排放影响臭氧层而外，对日益增多的工业及生活垃圾的处理也已成为令各国头痛的问题. 如一味采取燃烧和深埋等手段处理则又会形成新的公害. 废旧橡胶的处理亦面临这一困境. 分析认为最适当的解决办法是变废为宝，即把废旧橡胶再利用. 低温粉碎由于具有不产生废物、不污染环境，可以用较小的能耗达到更小颗粒度，破碎过程中不损坏材质等优点而受到越来越广泛的关注. 低温粉碎技术开拓了废弃橡胶的出路，具有较大的商业价值. 在我国，尽管起步晚，但由于有众多研究者潜心致力于这方面的开发和研究，已使这项技术进入了工业应用的中期阶段. 可以预言，使低温粉碎成为成熟的推广技术应用于大规模工业生产，并创造良好的经济效益之日已为期不远. 为获得冷冻的物料，不可避免地要涉及到冷源，也涉及到低温下的气固换热. 由于方法的多样性和相异性，本文在详细查考文献资料的基础之上，对固定床中径向导热进行了分析，得出了有益的结论.

前人对固定床(包括移动床)在低温下的气固换热研究也做过一定的工作[1],[2]，但均是在实验基础之上的讨论，未做较为深入而完善的理论分析. 至于流化床在低温下的应用研究则仍是一个空白. 流化床是固定床的后一个发展阶段，随着气体流速的增加，气固固定床向气固流化床过渡. 由于分析方法和实验手段的限制，文中流化床的型式采用振动流化床.

1 固定床中导热系数分析

对橡胶颗粒假设为球形的气固间传热加以分析，采用连续型模型的两相传热模型. 稳态时，床内的径向传热量是通过流体相的传热和通过固体相的传热两部分的加和.

1.1 固定床中的径向导热系数

对固定床床层内部传热的处理是将床层内发生的传导，对流和辐射三种机理合并，设想为等价的拟均相固体导热，用等价导热系数 λ_e 来表示. λ_e 又可分成径向和轴向的有效导热系数 λ_{er} 和 λ_{ez}. 理论研究历来主要是对床层内部传热特性 λ_{er} 进行分析，它是包括传导，对流和辐射机理的多种传热方式综合的传热过程.

径向导热系数由下式计算：

$$q = q_f + q_s = -\lambda_{er}\frac{\partial T}{\partial r}$$

其中，q 为单位面积上的总传热速率. 通过流体的传热量为

$$q_f = -\varepsilon_b(\lambda_c'\lambda_{td}'\lambda_r')\frac{\partial T}{\partial r}$$

其中，ε_b 为床层的空隙率；λ_c' 为基于空隙面积上的流体导热系数，是径向位置的函数；λ_{td}' 为流体横向混合传热的量度；λ_r' 为当量辐射导热系数.

λ_{td}' 按文献[3]，λ_r' 按文献[4]由下两式给出：

$$\lambda_{td}' = d_p G c_p/\varepsilon_b Pe_m$$

$$\lambda_r' = 4\delta[E/(2-E)]d_p T_m^3$$

其中，d_p 为颗粒直径；G 为气体体积流量；Pe_m 为

收稿日期：1999-01-12
作者简介：王晓新(1968－)，男，安徽蚌埠人，博士后，100083，北京.

平均贝克来(Peclet)数;E 为填料的发射率;T_m 为床层平均温度;δ 为波尔兹曼常数,$\delta=5.67\times10^{-8}$.

通过固相的传热是一个相当复杂的过程,不仅要考虑传热机理,尚需涉及固定床的几何特性.为分析方便提出以下假设:

① 把固定床看成拟均相系统,此点同两相模型矛盾,但分析表明,在仅对通过固相的传热加以分析时,造成的误差不是非常的大;

② 忽略颗粒中沿轴向传递的热量;

③ 以周围气体的温度来近似固体颗粒的平均温度;

④ 颗粒整个表面的传热用一个平均给热系数描述.

则通过固相的传热为

$$q_s=-\lambda'_{seri}(1-\varepsilon_b)\frac{\partial T}{\partial r}=-\frac{h\lambda_s d_p}{2\lambda_s+hd_p}(1-\varepsilon_b)\frac{\partial T}{\partial r}$$

其中,h 为总传热系数;λ_s 为固体颗粒的导热系数.

1.2 分析与讨论

最终求得径向导热系数 λ_{er} 的表达式为

$$\lambda_{er}=\varepsilon_b\left[\lambda_c+\frac{d_pGc_p}{Pe_m\varepsilon_b}+4\delta\left(\frac{E}{2-E}\right)d_pT_m^3\right]+(1-\varepsilon_b)\frac{h\lambda_s d_p}{2\lambda_s+hd_p}$$

把 λ'_c 用 λ_f(流体导热系数)代替,并考虑到低温条件下可以忽略辐射传热的影响,上式可简化为

$$\lambda_{er}=\varepsilon_b\left[\lambda_f+\frac{d_pGc_p}{Pe_m\varepsilon_b}\right]+(1-\varepsilon_b)\frac{h\lambda_s d_p}{2\lambda_s+hd_p}$$

可见,径向导热系数与床层空隙率 ε_b,颗粒导热系数 λ_s,颗粒粒径 d_p,气体导热系数 λ_f,气体流量 G 等有关.可以认为,这些参数对径向导热系数的影响与特定的研究条件、不同的物料和气流等有很大关系,进而可以得到,在一定的分析条件下,一些参数存在最佳值,而且这些值会随一些条件的变化而变化,给分析增加相应的难度.

对橡胶颗粒而言,由于其导热系数 λ_s 较低,尤其在低温段,导热系数还会降低,直接影响效果是使得 λ_{er} 降低.当然,λ_{er} 是由两项所组成的.前一项的影响即气体的影响也是很重要的,风速的增大亦即气流流量 G 增大对气固换热是有利的,使 λ_{er} 增大.另外,从上式来看,孔隙度的影响是不确定的,即 ε_b 增大将使气体影响项增大,但同时使固体影响项变小.当然,对低温下低导热率的橡胶颗粒气固换热来说,提高风速和增大孔隙率是适当的,将使 λ_s 对 λ_{er} 影响的比重下降.而要求 ε_b 的增大,则是要求采用流化床来取代固定床完成气固间的换热.

2 固定床气固传热关系式

固定床中气体与颗粒之间的传热,不仅仅是对流传热的过程,还应包括颗粒间接触点处的导热.因此气固传热可以归结为一种综合传热.而且对于高温过程,还需计及辐射换热,不过对本文研究的低温下气固换热过程来说,此项可以忽略.固体颗粒的形状对气固间换热的影响较大,而为了分析方便,假设固体颗粒为球形颗粒,不同形状的影响都归结于颗粒的有效系数 ϕ[5] 这个修正因子中.以下对单个球形颗粒在无限厚气体介质中的传热加以分析,并逐渐展开对传热关联式的讨论.

按照傅里叶定律,在无限厚静止气体中的单个球形颗粒的传热热流由气体导热系数 λ_f 和传热温差决定[6]

$$Q=-\lambda_f\cdot4\pi r^2\frac{dT}{dr}$$

对上式积分,从半径为 r_p 到无穷大,对应的温度由颗粒表面温度 T_s 到气体温度 T_∞,则得

$$Q=\lambda_f\cdot4\pi r_p^2(T_s-T_\infty)$$

又由牛顿冷却公式可得

$$Q=\alpha_p\cdot4\pi r_p^2(T_s-T_\infty)$$

合并以上两个方程,并考虑到努塞尔数的定义[7]可得

$$Nu_p=\frac{\alpha_p d_p}{\lambda_f}=2$$

显然,由于气体是静止的,上式中所得的值为最小值.

文献[8]考虑流体流过球形颗粒时,则将对流分量加到导热项上得到传热准则方程式为

$$Nu_p=2+0.6Pr^{1/3}Re^{1/2}$$

在固定床中,床层由众多颗粒共同组成,它们之间是相互作用相互影响的,亦即一个颗粒的传热和颗粒周围的气体流动都要受到相邻颗粒的影响.而且,颗粒附近的局部流速要比表观速度(即空塔速度)高得多[9].菱形排列的颗粒床($\varepsilon_b=0.26$)和随机填充的颗粒床($\varepsilon_b=0.42$)的传热关联式分别为

$$Nu_p=2+2.0Pr^{1/3}Re_p^{1/2}$$

$$Nu_p=2+1.8Pr^{1/3}Re_p^{1/2}$$

显然以上三式的分析方法对低温橡胶颗粒气固传热分析也是适用的,问题在于实验数据的获得方

法和关联式的最终建立.以上三式努塞尔数表达式均是针对 Geldart 分类中较细颗粒或粉状物料在常温或高温下获得的.由于传热机理的相似性,这些关联式也基本可用在对橡胶颗粒的气固传热的分析中,分析的结果可参见文献[10].但同时对橡胶颗粒低温下气固换热研究也是很必要的,一者它具有较强的针对性,二者可以为固定床在低温下的换热提供数据,从而追求更广泛适用的关联式.

3　振动流化床的传热关系式

3.1　传热关系式的建立

振动流化床内,气固两相非稳态传热主要包括两部分:①气流与颗粒表面之间的非稳态对流换热;②颗粒内部一维非稳态导热(将颗粒看成均匀球形的情况下).

对传热关系式的关联,必须预先求得对流换热系数,它是求解努塞尔数的必要条件.考虑到本文流动和换热的特殊性,采用理论分析和图解法相结合来求出对流换热系数.按文献[7]中的论述,对一维非稳态导热的求解即是采用图解法,基本思路是已知毕渥准则 Bi 和傅里叶准则 Fo 的情况下来求解导热温度场.显然本文此处的未知条件是 α,需要求解数 Bi,可以通过试算和插值来获得 α 的求解.

对球形颗粒来说,准则 Bi 和 Fo 准则分别如下所示

$$Bi=\frac{\alpha R}{\lambda}\qquad Fo=\frac{a\tau}{R^2}$$

式中,α 为对流换热系数;λ 为橡胶的导热系数;τ 为时间;R 为橡胶颗粒的半径;a 为导温系数.

对于振动流化床来说,影响气流与固体颗粒之间对流换热系数的因素除了橡胶颗粒的物性数据,气体流动速度等而外,还应计及振动强度和料层厚度的影响,即[11]

$$\alpha=f(u,d_p,\rho,\mu,\lambda,c_p,A,H)$$

式中,A 为振幅;H 为料层厚度.分析表明,影响换热系数的各参数并不是各自独立的,它们之间是相互制约的,并且可以归到以一些无量纲准则数来表达.根据相似理论,对于强迫对流换热,上式可改写为[12]

$$Nu=f(Re,Pr,\Gamma,\overline{H})$$

式中,Γ 为振动强度;$\overline{H}$ 为无量纲料层厚度.按文献[7],[13],上式可表示成指数函数的形式,即

$$Nu=C_1Re^{C_2}\Gamma^{C_3}\overline{H}^{C_4}Pr^{C_5}$$

其中,C_1,C_2,C_3,C_4,C_5 为待定常数,可通过数据关联来确定.

各无量纲准则数如下定义:

$$Re=\frac{ud_p}{v}\qquad Pr=\frac{v}{a}\qquad Nu=\frac{\alpha d_p}{\lambda}$$

$$\Gamma=\frac{A\omega^2}{g}\qquad \overline{H}=\frac{d_p}{H}$$

式中,u 为气流的表观速度;v 为流体的运动粘度;A 为振幅;ω 为振动频率;g 为当地的重力加速度;H 为床层高度.

在本文的研究范围内,低温气体的 Pr 值可认为基本上保持不变,所以

$$Nu=C_1Re^{C_2}\Gamma^{C_3}\overline{H}^{C_4}$$

3.2　传热关系式的分析

通过方程两边取对数,代入实验数据,并经过多元线性回归计算,把所得的各回归系数代入原方程可以得到传热关联式如下:

$$Nu=0.15Re^{0.207\blacksquare125}\Gamma^{0.904\blacksquare626}\overline{H}^{0.543\blacksquare917}$$

随雷诺数的增大换热系数上升是很容易解释的.振动强度增大而引起对流换热系数的提高可以把原因归于以下两点:①振动的加入使物料更易于流化,尤其对于橡胶大颗粒,振动的影响效果更加明显;②振动使物料相互碰撞加强,有效地破坏了颗粒表面的传热膜阻力.料层厚度的增加使得对流换热系数下降,应当与料层太厚使气流阻力增大,孔隙率也较薄料层时为小有关.而且料层过厚也对流化效果不利,造成传热系数下降.另外,振动强度的指数接近 1,雷诺数的指数仅在 0.2左右,显然振动对传热系数的影响占优.从增大换热系数的角度来考虑,增大振动强度是很有效的.

3.3　和普通流化床的对比

由于普通流化床对采用大颗粒进行操作的文献一直没有查到,所以本文这里仅从传热关联式方面对一些研究者所得出的传热性能加以对比.文献[14]中根据塞状流模型,分析了所发表的实验结果,把普通流化床中的气固传热整理成以下关系式

$$Nu=0.03Re^{1.3}$$

同振动流化传热关联式相比,普通流化床传热关系式中雷诺数 Re 的指数要高得多,可见普通流化床气固传热对气流速度有很高的依赖性.对振动流化床而言,由于振动强度 Γ 的指数最高,远高于 Re 数的指数,显然振动流化床中气固传热更多地是依赖振动来完成.

分析认为振动还有以下三个方面的优点:①

使物料在分布板上向前移动，省去了物料输送所需的能量；②使床内扰动增强，流态化效果显著好转，起始流态化速度的降低又节约了大量的动力；③使传热性能大大增强.

同普通流化床相比，达到基本相似的传热效果，振动流化床的气流速度可以大幅度降低，具有很强的节能效果[15].

4 结 论

通过对固定床和振动流化床中橡胶颗粒气固传热的理论探讨，得出以下结论：

1）从径向导热系数的分析可以得到，对橡胶颗粒这种低导热率的物料来说，采用流化床是有其理论依据的，它可以使橡胶颗粒的低导热率的影响减至很小；

2）从气固传热的关系式来看，振动流化床中的气固传热更多地是依赖振动强度，而不是象固定床和普通流化床完全是靠气流的速度；

3）尚需做进一步的工作来获得更加普适的传热关系式才能更加全面描述固定床和流化床中气固传热的特性.

参 考 文 献

[1] 李雪松. 绝热固定床中气固两相非稳态传热特性研究[D]. 西安：西安交通大学能源与动力工程学院，1994.

[2] 斎藤文良. ぜい性碎料の破碎に关する基础的研究[J]. 粉体工学会志，1983，20(4)：233～235.

[3] Yagi S，Kunii D. Studies on effective thermal conductivities in packed beds[J]. AIChE J，1957，3(3)：373～381.

[4] Kunii D，Smith J M. Heat transfer characteristics of porous rocks[J]. AIChE J，1960，6(1)：71～78.

[5] 袁乃驹，丁富新. 化学反应工程基础[M]. 北京：清华大学出版社，1988.

[6] 罗森诺 W M 主编. 传热学应用手册[M]. 谢 力译. 北京：科学出版社，1992.

[7] 杨世铭. 传热学[M]. 第2版. 北京：高等教育出版社，1987.

[8] Ranz W E，Marshall W R. Evaporation from drops (part II)[J]. Chem Eng Progr，1952，48(4)：173～180.

[9] Ranz W E. Friction and transfer coefficients for single particles and packed beds[J]. Chem Eng Progr，1952，48(4)：247～253.

[10] 王晓新，郭有仪，束鹏程，等. 固定床移动床传热模型及低温传热分析[J]. 低温与超导，1996，24(4)：62～67.

[11] 王晓新. 振动流化的低温气固传热研究[D]. 西安：西安交通大学能源与动力工程学院，1997.

[12] 王 莉. 低温绝热移动床中气固两相传热特性的研究[D]. 西安：西安交通大学能源与动力工程学院，1995.

[13] 戴锅生. 传热学[M]. 北京：高等教育出版社，1991.

[14] Kunii D，Levenspiel O. Fluidization engineering[M]. New York：Wiley，1969.

[15] 郭有仪，王晓新，束鹏程. 振动对流化床性能影响的分析研究[J]. 化工装备技术，1997，18(2)：1～3.

Investigation on Heat Transfer between Gas and Rubber Particles in Fixed Bed and Vibrated Fluidized Bed

WANG Xiao-xin YUAN Xiu-gan

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics，Dept. of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics)

Abstract：The effect of parameters on radial heat conductive coefficient is analyzed by researching into radial heat conductivity of rubber particles in fixed bed. The fluidized bed should be applied to enhance the process of heat transfer between gas and solids in order to minimize the effect of lower heat conductivity of rubber. It is indicated that vibration strengthen more than gas velocity affects heat transfer in vibrated fluidized bed (VFB) from the analysis of the correlations. In the case of reaching the same heat transfer results，the VFB can decrease gas velocity more than common fluidized bed can do，and energy conservation may be realized by using VFB technology.

Key words：fixed bed；fluidized bed reactors；heat transfer