圆筒型混合器中颗粒混合运动的研究

欧阳鸿武,何世文,廖奇音,韦　嘉

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室,湖南长沙,410083)

摘要:采用 2 种不同颜色的硅胶颗粒,研究混合器的填充率、转速等对颗粒混合过程的影响,探明颗粒在圆筒型混合器中的运动形态和混合机理。研究结果表明:混合过程中颗粒运动的流线不断被拉伸和弯曲,是形成颗粒扩散运动的重要机制;填充率和转速对颗粒的混合运动有明显影响:在填充率不变时,混合效果随混合器转速的提高(接近离心状态之前)而提高;当转速不变时,混合效果随填充率的提高(不超过 70%)而提高;随填充率和转速的提高,颗粒的运动模式由 Rolling 模式逐步向 Cascading 模式发展。

关键词:圆筒型混合器; 混合; 颗粒

中图分类号:TF121　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1672-7207(2004)01-0026-05

Research on granular mixing in rotating drum blender

OUYANG Hong-wu, HE Shi-wen, LIAO Qi-yin, WEI Jia

(State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A series of experiments were carried on rotating drum blender of rotating drum blender and two kinds of silica granules in different colour to explore the characteristics and mixing mechanism of grains . This paper analysis the influences of rotation speed and vessel fill percentage on mixing efficiency . The results indicate that the granules mixing motion is impacted by vessel fill percentage and rotation speed . As the rotating speed and vessel fill percentage increasing, the mixing efficiency is enhanced and the move styles of granules in rotating drum blender changed from Rolling to Cascading .

Key words: rotating drum blender; mixing; granules

粉体的混合运动是一个非常复杂的过程[1]。粉体运动的复杂性源于粉体的特殊物理性质。单个颗粒具有一般固体的性质,然而大量颗粒构成的粉体却超越了固体、液体和气体的界限,表现出许多特殊性,很难用固体、液体或气体的性质来描述。粉体是物质的一种特殊形态,相应地,粉体运动也是物质运动中的一种特殊形式[2]。不同的粉体,其物性存在很大差异,因此不同粉体的混合过程和混合效果不同。目前还没有一种通用的混合器能用于混合各种粉末,往往要根据粉末的物性选取合适的混合器和相应的工艺参数。粉末的物性、混合器的结构和性能、混合工艺参数和混合环境都对混合过程和效果有显著的影响[3]。

在众多的旋转型混合器中,圆筒型、V 型、Y 型和双锥型混合器的应用较广泛。由于采用圆筒型混合器便于观测颗粒的混合运动,因而圆筒型混合器成为研究颗粒混合过程的重要对象。D .Brone 等研究了转速、颗粒粒径和填充率 3 个因素对混合过程的影响[4],得出了混合过程中均匀度随 3 个因素呈负指数关系变化的回归表达式;MEI Ren-mei 等和 T .Shinbrot 观察了填充率的变化对颗粒运动状况的影响[5,6]。S .Osama 等对圆筒型混合器中粉体运

收稿日期:2003-08-10

基金项目:国家"863"高技术项目(2001AA332010)

作者简介:欧阳鸿武(1964-),男,湖南长沙人,中南大学教授,从事粉末冶金技术和理论研究

论文联系人:欧阳鸿武,男,教授;电话:0731-8836264(H);E-mail:oyhw1816@sina .com

动状况的转变过程进行了研究[7];C .Lun 等对圆筒型混合器中粉体的运动状况进行了归类和理论分析[8];L .Smith 和 D .Zhang 等对圆筒型混合器混合过程进行了数值模拟研究[9,10]。孙其诚等对颗粒的混合技术及其评价方法进行了广泛和深入的研究[11-17]。研究结果表明,圆筒型混合器虽然结构简单,但混合过程和运动非常复杂,至今不清楚多种因素耦合时对混合过程的影响。

在此,作者通过观察硅胶颗粒在圆筒型混合器中的混合运动,填充率和转速对颗粒运动状况的影响,研究颗粒的混合机理。

1　实验方法

混合实验在圆筒型混合器中进行。该混合器是绕其中心轴作纯旋转的透明玻璃圆筒,呈水平放置,能够在 0~ 100 r/min 时无级调节。实验用圆筒混合器的直径为 15 cm,高为 8 cm,体积为 1410 cm^3。硅胶颗粒的形状呈近球形,粒径为 2~ 3 mm,流动性良好。干燥的硅胶颗粒呈深蓝色,受潮的硅胶颗粒呈粉红色或白色。

实验分为 2 个部分:

a .研究填充率分别为 15%,30%,50%和 70%,转速变化(100,80,60,40 和 20 r/min)时硅胶颗粒的混合运动状况。

b .观察左右装颗粒时,双色硅胶的混合过程。

2　实验结果和分析

2 .1　混合运动的影响因素

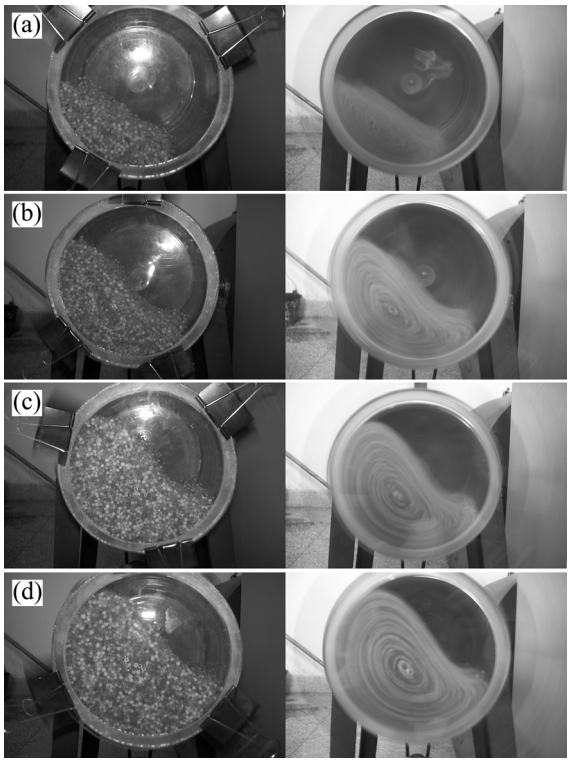
2 .1 .1　转速对混合运动的影响

转速为 40 r/min,填充率由 15%变化到 70%时硅胶混合运动情况如图 1 所示。

粉体在圆筒型混合器中的运动大致有如图 2 所示的 6 种形态[15],分别是 Slipping(滑移)、Slumping(阶梯)、Rolling(滚动)、Cascading(小瀑布)、Cataracting(大瀑布)和 Centrifuging(离心)。从图 1 可以看出,填充率为 15%时的颗粒运动属于 Rolling 模式,填充率为 30%和 50%时运动发展为 Cascading 模式,而填充率为 70%时的运动介于 Rolling 和 Cascading 模式之间,没有发展成 Cataracting 模式。

颗粒在圆筒型混合器中的混合运动状况可分为如图 3 所示的 2 个区域[18]:静止区和滑移区。在静止区,颗粒随混合器运动,与混合器内壁无相对运动;滑移区中的颗粒与静止区中的颗粒形成相对运动,静止区与滑移区的颗粒间存在一个剪切层。

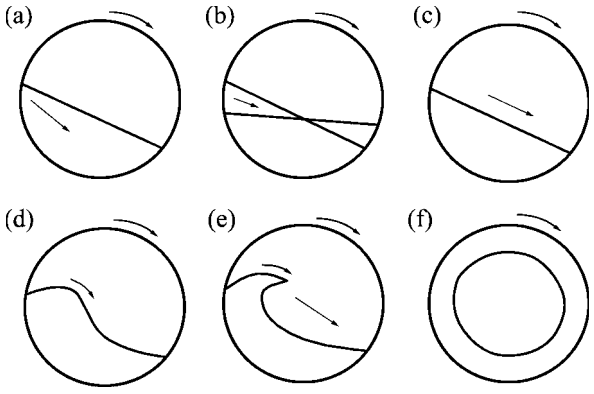
随着转速的提高,滑移区的形状发生变化,自由表面的形状由平面逐渐变化为"S"形,自由表面的倾角随转速的加快而变大。颗粒在混合过程中,形成"涡心",处于"涡心"中的颗粒保持"静止"。"涡心"的形状随转速的加快,由扁平形逐渐变为卵石形,说明滑移层中的颗粒正逐步由纯滑移向抛落运动演变,即向小瀑布运动方式发展。可见,当转速不变时,提高填充率有利于提高混合效率,这与文献[12]中的结果一致。



拍摄照片的快门速度:左边为 1/1 000 s,右边为 0 .5 s
填充率:(a)—15%;(b)—30%;(c)—50%;(d)—70%

图 1　转速为 60 r/min、填充率不同时颗粒的运动状况

Fig .1　Movement of granular under 60 r/min at different fill percentages



(a)—滑移;(b)—阶梯;(c)—滚动;
(d)—小瀑布;(e)—大瀑布;(f)—离心

图 2　圆筒混合器中粉体的 6 种运动模式

Fig .2　Six kinds of movement models of granular in rotating drum blender

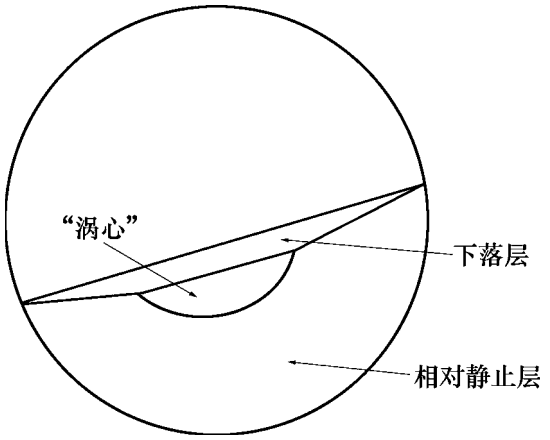
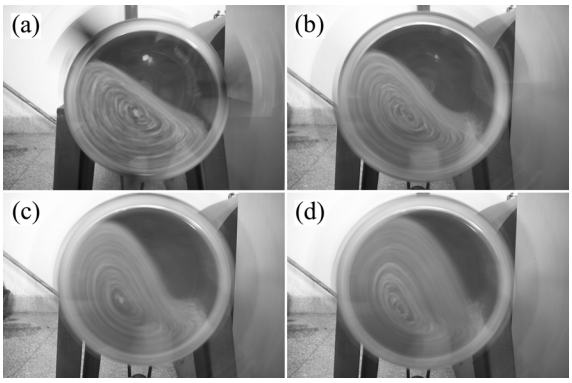


图 3 圆筒混合器中粉体的运动示意图

Fig . 3 Movement model of granular in rotating drum blender

2 .1 .2 填充率对混合运动的影响

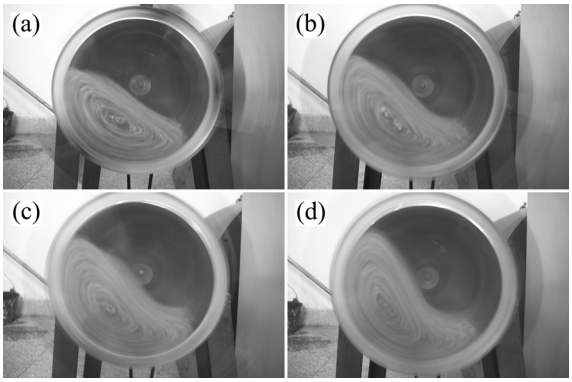
改变转速,观察硅胶颗粒在不同填充率时的运动状况,实验结果如图 4 和图 5 所示。



转速/(r · min^{-1}): (a)—40; (b)—60; (c)—80; (d)—100

图 4 填充率为 50%、转速不同时硅胶的运动状况

Fig . 4 Movement of granular in different speed under 50% fill percentage



转速/(r · min^{-1}): (a)—40; (b)—60; (c)—80; (d)—100

图 5 填充率为 30%、转速不同时硅胶的运动状况

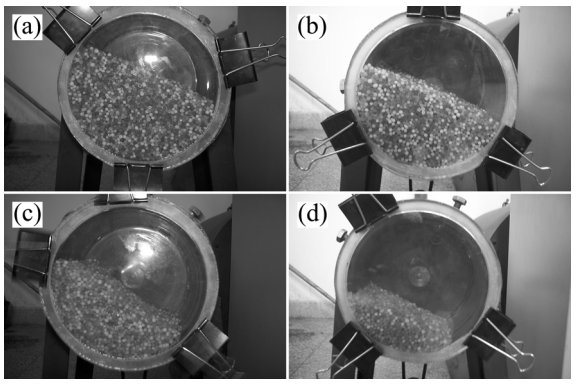
Fig . 5 Movement of granular in different speed under 30% fill percentage

可见,颗粒填充率为 50% 时,随着转速的加快,硅胶的运动发生显著变化。转速为 40 r/min 时,硅胶运动为 Rolling 型,转速提高到 60 r/min 时,硅胶颗粒的运动发展为 Cascading 型,自由表面呈“S”形。对比转速为 80 r/min 和 100 r/min 时的运动状况,差别更为明显:转速为 80 r/min 时,自由表面仍是“S”形,而转速为 100 r/min 时,自由表面层中的硅胶颗粒处于抛落状况。可见,在填充率固定时,随着转速的变化,硅胶颗粒的运动状况发生类型的变化,颗粒运动类型的变化对混合效果产生影响。

填充率为 30%,转速分别为 40, 60, 80 和 100 r/min时硅胶颗粒的运动情况如图 5 所示。可见,随着转速的加快,硅胶颗粒的运动状况由 Rolling 型过渡为 Cascading 型,混合区域增大,混合运动更为剧烈,混合效果得到提高。这与文献[5]和[6]中的结论一致。

对比图 4 和图 5 可以看出,转速同为 100 r/min 时 ,运动模式却不相同,可见填充率对运动模式有直接影响。在转速相同时,提高填充率有利于颗粒运动的剧烈化,即有利于提高颗粒的混合效果。

混合结束后,自由表面的安歇角没有因填充率的变化而改变,都保持为 23°,如图 6 所示。



填充率/%:(a)—70; (b)—50; (c)—30; (d)—15

图 6 混合后硅胶的安歇角

Fig . 6 Rest angles of granular after mixing

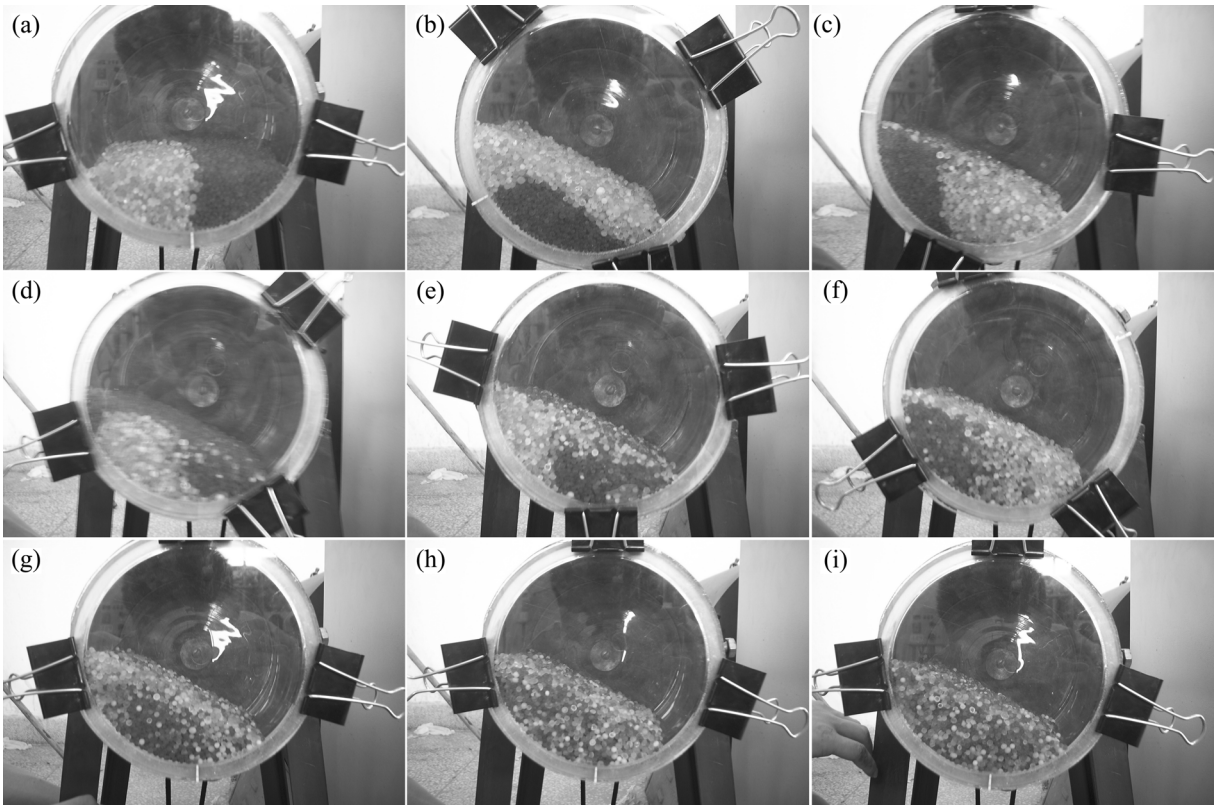
2 .2 硅胶颗粒的混合过程

粉体的混合机理主要有扩散、对流和剪切运动 3 种[13]。扩散指单个颗粒进入粉团的过程;对流指相邻的粉团从物料中的一处移到另一处的过程;剪切指颗粒间存在相对运动,在物料面形成若干滑移面,而相互混合、掺和的过程。实际的混合过程是几种机制的混合作用。

粉体间的混合大致经历 3 个阶段[19]:

a . 对流混合阶段,宏观混合很快;

b . 对流与剪切共同作用阶段,混合速度减慢;



旋转角/(°):(a)—0;(b)—45;(c)—90;(d)—135;(e)—180;(f)—225;(g)—360;(h)—720;(i)—1 080

图 7　左右装硅胶旋转 3 圈的混合过程

Fig .7　Mixing process of granular loaded side by side

c .扩散混合阶段,粉体的混合与分离相平衡,混合均匀度上下波动,粉体处于微观混合状态。粉体混合的均匀度取决于最终的扩散运动。

为了了解圆筒型混合器中硅胶颗粒的混合机理,按 30%的填充率(红色和蓝色硅胶所占体积各为 15%)将 2 种不同颜色的硅胶左右装入,观察颗粒混合过程。混合器的转速为 10 r/min,混合过程如图 7 所示。其中,图 7(a)所示为左右装硅胶颗粒的初始情况,图 7(i)所示为圆筒混料器沿顺时针旋转 3 圈后的过程状况。

从图 7(a)和图 7(b)可以看出,旋转 1/8 圈后,自由表面的倾角基本形成且角度与安歇角差不多。在旋转过程中,双色硅胶间的界面由最初的平面(直线)逐步被拉伸,弯曲变形成为弧面(弧线),由于不同颜色的颗粒相互渗透,清晰的界面逐渐变得模糊。拉伸和弯曲这 2 种运动的共同作用,产生颗粒间的剪切和扩散运动,这是颗粒混合的主要机理。硅胶颗粒在混合过程中,由自由表面形成的拉伸,使颗粒间形成间隙,为颗粒的镶入提供空间,在随后的弯曲过程中,相邻层的颗粒相互渗透。在进入“静止区”后,交界面上颗粒的相对位置保持稳定,为下一轮回的拉伸和弯曲提供新的初始条件。从图 7(i)可以看出,经过 3 圈后,2 种颜色的硅胶颗粒已较充分混合。

颗粒的混合是颗粒运动流线不断被拉伸和弯曲的循环迭代过程。从理论上分析,由具有非线性物性的颗粒物组成的混合物,在混合过程中可能产生混沌运动。Y .L .Ding 等通过研究发现,颗粒在圆筒型混合器中的混合运动是复杂的混沌运动[19,20]。

3　结　论

a .硅胶颗粒在圆筒型混合器中的混合运动模式和混合效果受填充率和转速的影响。填充率不变时,随着混合器转速的提高,混合效果提高(离心状态除外)。转速不变时,混合效果随填充率增大(不超过 60 %)而提高。随填充率和转速的提高,颗粒的运动模式呈现由 Rolling 模式向 Cascading 模式发展的趋势。

b .在混合过程中,颗粒运动的流线不断被拉伸和弯曲,是形成颗粒扩散运动的重要机制。在其他条件相同时,流线的拉伸和弯曲的强度及频率,主要

取决于混合器的转速和填充率。

参考文献:

[1] 陆厚根.粉体技术导论[M].上海:同济大学出版社,1998:198-201.
LU Hou-gen. Introduction of granular technology [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998: 198-201.

[2] 厚美英,陈坤权.奇异的颗粒物质[J].科学,2000,53(1):28-31.
HOU Mei-ying, CHEN Kun-quan. Unique features of granular material[J]. Science, 2000, 53(1): 28-31.

[3] rone D, Wightman C, Connor K, *et al*. Using flow perturbations to enhance mixing of dry powders in V-blenders [J]. Powder Technology, 1997(91): 165-172.

[4] rone D, Muzzio F J. Enhanced mixing in double-cone blenders [J]. Powder Technology, 2000, 110(2): 179-189.

[5] EI Ren-wei, SHANG Hong, Otis R. Concentration non-uniformity in simple shear flow of cohesive powders [J]. Powder Technology, 2000, 112(1): 102-110.

[6] hinbrot T, Alexander A, Muzzio F J. Spontaneous chaotic granular mixing [J]. Nature, 1999(397): 675-678.

[7] sama S, Muzzio F J. Quantitative characterization of mixing of free-flowing granular material in tote (bin)-blenders [J]. Powder Technology, 2002, 126(2): 191-200.

[8] un C K K, Savage S B, Jeffrey N J, *et al*. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field [J]. Fluid Mech, 1984, 140(4): 223-256.

[9] mith L. Monto Carlo simulation of particle behavior [J]. MPR, 2001, 23(1): 32-35.

[10] hang D, Whiten W J. An efficient calculation method for particle motion in discrete element simulations [J]. Powder Technology, 1998, 98(2): 223-230.

[11] 孙其诚,王光谦,杨 宁.水平圆筒型混合机中颗粒混合的离散模型[J].中国粉体技术,2002,8(1):6-9.
SUN Qi-heng, WANG Guang-qian, YANG Ning. The discrete model of granular mixing in rotating drum blender[J]. The Chinese Journal of Powder Technology, 2002, 8(1): 6-9.

[12] aher M, Troy S, Fernando J M. Experimentally validated computations of flow, mixing and segregation of non-cohesive grains in 3D tumbling blenders[J]. Powder Technology, 2000(109): 58-71.

[13] ttino J M, Khakhar D V. Fundamental research in heaping, mixing, and segregation of granular material: challenges and perspectives[J]. Powder Technology, 2001(121): 117-122.

[14] ccarthy J J, Ottino J M. Particle dynamics simulation: a hybrid technique applied to granular mixing[J]. Powder Technology, 1998(97): 91-99.

[15] an Puyvelde D R, Young B R, Wilson M A. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum image analysis[J]. Powder Technology, 1999, (106): 183-191.

[16] uzzio F J, Robinson P, Wightman C, *et al*. Sampling praetices in powder blending[J]. International Journal of Pharmaceutics, 1997, 155(2): 153-178.

[17] arolyn W, Fernando J M. Mixing of granular material in a drum mixer undergoing rotational and rocking motions[J]. Powder Technology, 1998(98): 113-124.

[18] ing Y L, Forster R, Seville J P K, *et al*. Granular motion in rotating drums: bed turnover time and slumping-rolling transition[J]. Powder Technology, 2002(124): 18-27.

[19] 冀春荣,何唤强,李 燕.混沌及其工程应用[J].新技术新工艺,1998(1):3-5.
JI Chun-rong, HE Huan-qiang, LI Yan. Chaos and its application in engineering[J]. New Technology and Process, 1998(1): 3-5.

[20] ccarthy J J, Khakhar D V, Ottino J M. Computational studies of granular mixing [J]. Powder Technology, 2000(109): 72-82.