生物质热裂解双仓式气力输送喂料装置输料特性

王娜娜[1, 2]，李萍[1]，司慧[1]，齐敬一[1]

（1.北京林业大学工学院，北京100083；2.山东理工大学农业工程与食品科学学院，山东淄博255000）

摘要：设计制造了一套生物质热裂解用双仓式气力输送喂料装置，研究流化气速、喷动气速、有效喷射距离（s=50 mm、100mm、150mm、200mm）、输料管内径（d1=21mm、24mm、29mm）和生物质颗粒粒径对进料率的影响。试验结果表明，进料率随着流化流速、喷动气速、输料管内径、生物质颗粒粒径的增大而增大。在有效喷射距离为100 mm时，进料率最高。固气比随着流化气或喷动气速的增加先增加后降低，在流化气和喷动气的共同作用下，随着气体流速的增加固气比一直在降低。为了描述进料率与喷动气速、流化气速、有效喷射距离、输料管内径以及生物质颗粒粒径之间的关系，采用多元线性回归分析，建立了多元线性回归模型。开展了额外试验验证模型的准确性，结果表明试验值和预测值误差在±10.2%以内，表明所建立的模型可靠，可以利用该模型预测喂料器的进料率。

生物质能作为一种环境友好型可再生能源，已成为国内外可再生能源研究领域的热点之一。生物质能转化利用方法很多，其中生物质快速热裂解技术是国际上公认的最具有发展潜力的技术之一。在生物质热裂解过程中，稳定连续进料是保证热裂解顺利进行的关键因素之一[1-2]。目前，热裂解进料装置主要有螺旋进料装置[3-5]、气力输送进料装置[6-9]、旋转刮刀喂料装置[10-11]等。其中，气力输送具有结构紧凑、操作方便、安全可靠等特点，广泛应用于煤粉、粮食等流动性好的物料[12-16]。但是，由于生物质粉具有密度小、休止角大、流动性差等特点，导致生物质在气力输送过程中易发生搭桥、堵塞管路等问题[17]。为了提高物料的流动性，Wen等[18]最早把流化床引入到物料输送领域，研究了玻璃珠和煤粉从流化床一侧出口通过不同管径水平管的流动特性。Massimilla等[19]设计了流化床进料器，研究石英砂、木屑、玻璃珠等从流化床侧壁孔流出的特性，结果表明固体质量流率与出料孔径大小有关。Suri等[20]设计了筒形进料器，在流化床中央设置一垂直出料管并与水平输料管相连，用于木炭、玻璃微珠等的水平输送。结果表明，固体质量流率随着粒径和内摩擦角的增大和流化空气流速的减小而减小。

到目前为止，基于流化床原理设计的气力输送装置用于生物质热裂解进料鲜有报道，Wang等[21]设计了双重气力输送进料装置，开展了喷动管内径、布风板开孔率等研究，实现稳定进料。然而关于输料管内径、生物质粒径等对进料率影响的研究较少。本文在双重气力输送进料器基础上，设计了生物质热裂解双仓式气力输送喂料装置，研究输料管内径、有效喷射距离、生物质颗粒粒径等因素对进料率影响。该装置从进料仓底部通入流化气，防止物料搭桥或团聚，利用喷动气和流化气的共同作用实现物料输送，而进料仓和过渡仓的双仓设计能实现连续稳定进料。

1试验

1.1试验装置

试验装置如图1所示，主要包括料斗、过渡仓、进料仓、布风板、喷动管和输料管等。过渡仓、进料仓由内径200mm，高分别为280mm、300mm，壁厚10mm的有机玻璃加工而成。在距离布风板高35mm管壁上对称开有两个直径为35 mm的孔。为了测试输料管内径对进料率的影响，分别加工了3根内径为29mm、24mm、21mm的输料管和1根内径为21 mm的喷动管，长度均为250mm，进料管与喷动管同轴布置。进料仓布风板孔径1mm，开孔率1.09%，等边三角形布置。

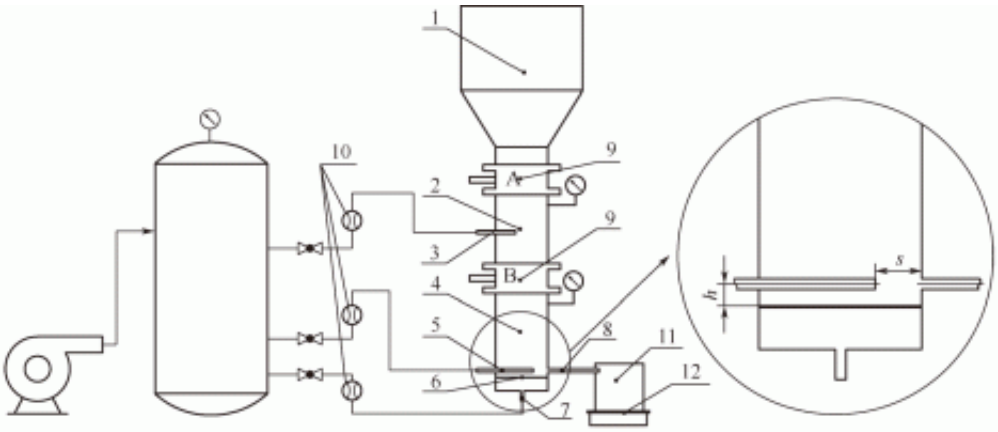

图1　流化床式喂料装置示意图

1—料斗；2—过渡仓；3—扰动管；4—进料仓；5—喷动管；6—布风板；7—流化气入口；8—输料管；9—电动蝶阀；10—玻璃转子流量计；11—接收罐；12—电子秤

试验以空气为气源，利用气泵对稳压罐进行供气，实现稳压。缓冲罐设有3个出气口，分别为进料装置提供流化气、扰动气和喷动气。控制系统包括3个电磁阀、2个电动蝶阀、3对光敏传感器（分别安装在过渡仓和进料仓上，用来检测料仓内物料的高度）。工作原理为：料斗中装满物料，电动蝶阀A打开，物料开始下落，光敏传感器检测到过渡仓内物料已满，A关闭。扰动气打开，当过渡仓内压力稍高于进料仓时（进料仓内压力101.113～101.521kPa），然后电动蝶阀B打开，光敏传感器检测到进料仓内物料已满，B关闭，扰动气关闭，流化气和喷动气打开，开始进料。当光敏传感器检测到进料仓物料低位，A打开，重复上述过程，实现连续进料，输料管流出的物料进入收集罐，用电子秤进行称重。工作过程中过渡仓内的压力不能低于进料仓才能保证物料从过渡仓顺利落入进料仓内，过渡仓和进料仓装有压力表，用来测量压力。

1.2试验材料

试验材料为落叶松，颗粒特性见表1，粒度dp分别为30～60目、60～90目、90～120目和粗筛组分30～120目。

表1　落叶松物料颗粒特性

粒度/目	堆密度/kg·m^{-3}	粒径/mm	含水率/%
30～60	152.31	0.364	7.58
60～90	160.48	0.198	7.72
90～120	167.55	0.137	7.94
30～120	163.37	0.184	7.75

1.3试验设计

输料管内径为d1=21mm、24mm、29mm。有效喷射距离取s=200mm、150mm、100mm、50mm。输料管和喷动管轴线距离布风板高h=35mm。研究流化气速、喷动气速、输料管内径、有效喷射距离、生物质颗粒粒径对进料率影响。

2结果与分析

2.1固气比的计算方法

固气比为进料率与气体质量流量的比值，利用式(1)进行计算。

$$k = \frac{m_s}{m_g} = t\frac{m}{Q\rho} \tag{1}$$

式中，m_s为单位时间落叶松颗粒的输送质量，g/s；m_g为单位时间空气质量流量，g/s；m为收集到的落叶松颗粒质量，g；t为进料时间，s；Q为单位时间内空气体积流量，m^3/s；ρ为空气密度，g/m^3。

2.2流化气速/喷动气速对进料率影响

关闭喷动气速，进料仓内只通入流化气速时，流化气速对进料率影响如图2所示。关闭流化气路，进料仓内只通入喷动气时，喷动气速对进料率影响如图3所示。从图2、图3中可看出无论流化气速还是喷动气速增加，输料率均快速增加，标准差下降。这说明随着气体流速的增加，输料稳定性增加。对比图2、图3可以看出，在相同的气体流量下，只通入流化气时进料率比仅通入喷动气时小，气体流量为$3m^3/h$（此时流化气速0.0265m/s，喷动气速2.407m/s），仅通入流化气时进料率为10.2g/s，仅通入喷动气时进料率为20.1g/s，进料率增加了82.8%，这说明进料仓内通入喷动气比流化气更有利于进料。从图2、图3可以看出，通入流化气时，进料率标准差的波动较小，这说明通入流化气更有利于物料流动的稳定性和连续性。

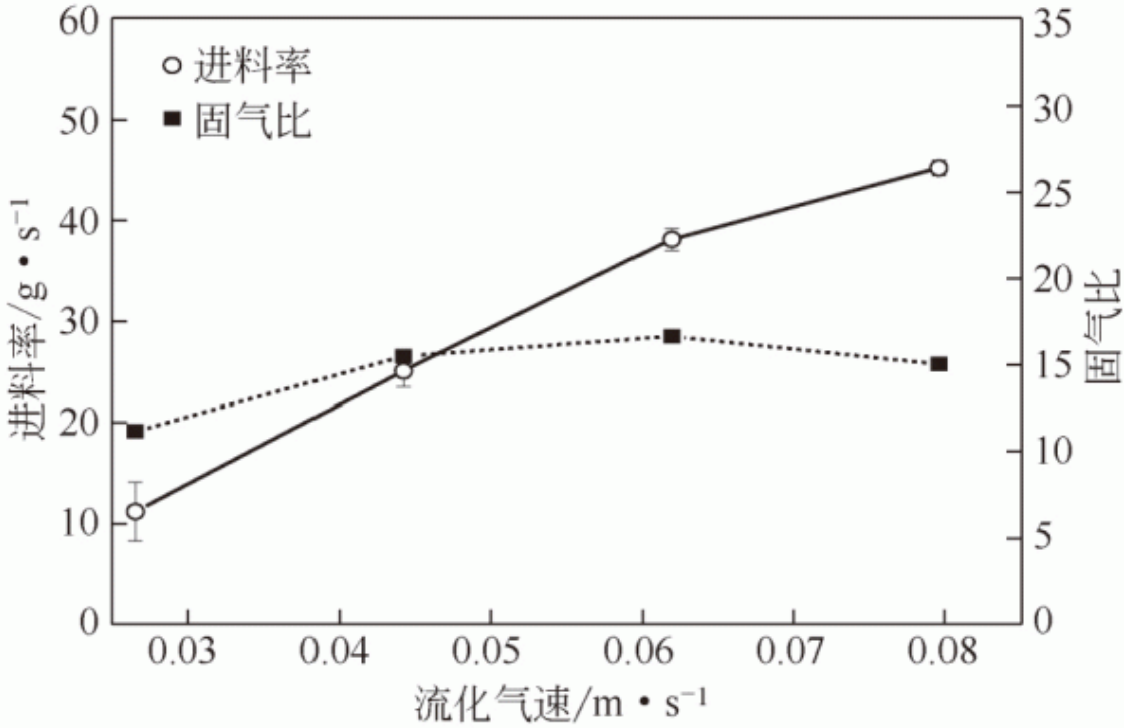

图2　流化气速对进料率影响

（d_p=30～120目，d_1=21mm）

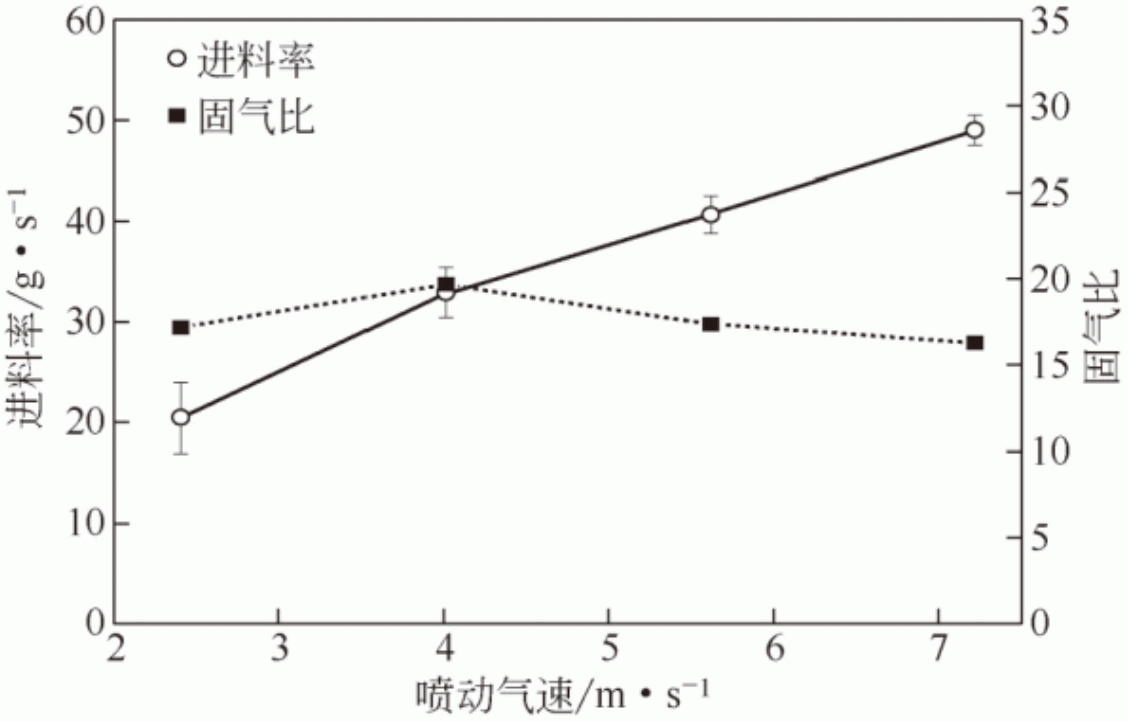

图3　喷动气速对进料率影响

（d_p=30～120目，d_1=21mm，s=100mm）

试验观察到在较低的流化/喷动气速时，物料不断地在输料管底部堆积，这是由于在较低气体流速时，其动能较小，物料不能被流化/喷动气全部携带走[22]，当颗粒堆积到一定程度时，颗粒流动状态将由带状流转变为丘状流，这将导致物料流动的不稳定性。Wypych等[23]也在实验中观察到类似现象。

从图2、图3中还可以看出，进料率随着流化/喷动气速的升高而升高，这是因为随着气体流速的增加，颗粒速度增加，所以进料率一直在增加。在流化/喷动气速较小时，固气比随着气体流速的增加而增大；当气体流速增大到一定值时，固气比达到最高值；继续增大气体流速，这时的气体流量相对于输料管中的物料有剩余，所以固气比反而减少[24-25]。

2.3有效喷射距离对进料率影响

关闭流化气速，有效喷射距离对进料率影响见图4。在同样的喷动气流速下，有效喷射距离s=100mm时，进料率最大。当有效喷射距离为150mm、200mm时，有效喷射距离的增加会引起气体动能的耗散，故此时进料率会降低。当有效喷射距离为50mm时，在较低喷动气流速时，进料率比s=150mm、200mm时大。而在较高流化气速时，进料率反而比s=150mm、200mm时小。这由于有效喷射距离50mm时，虽然缩短了生物质进入输料管的距离，但喷动气作用的范围减小，导致喷动管上、下某些位置处，有些物料不能快速流出，所以此时尽管有效喷射距离很小，输料率依然较低[21]。

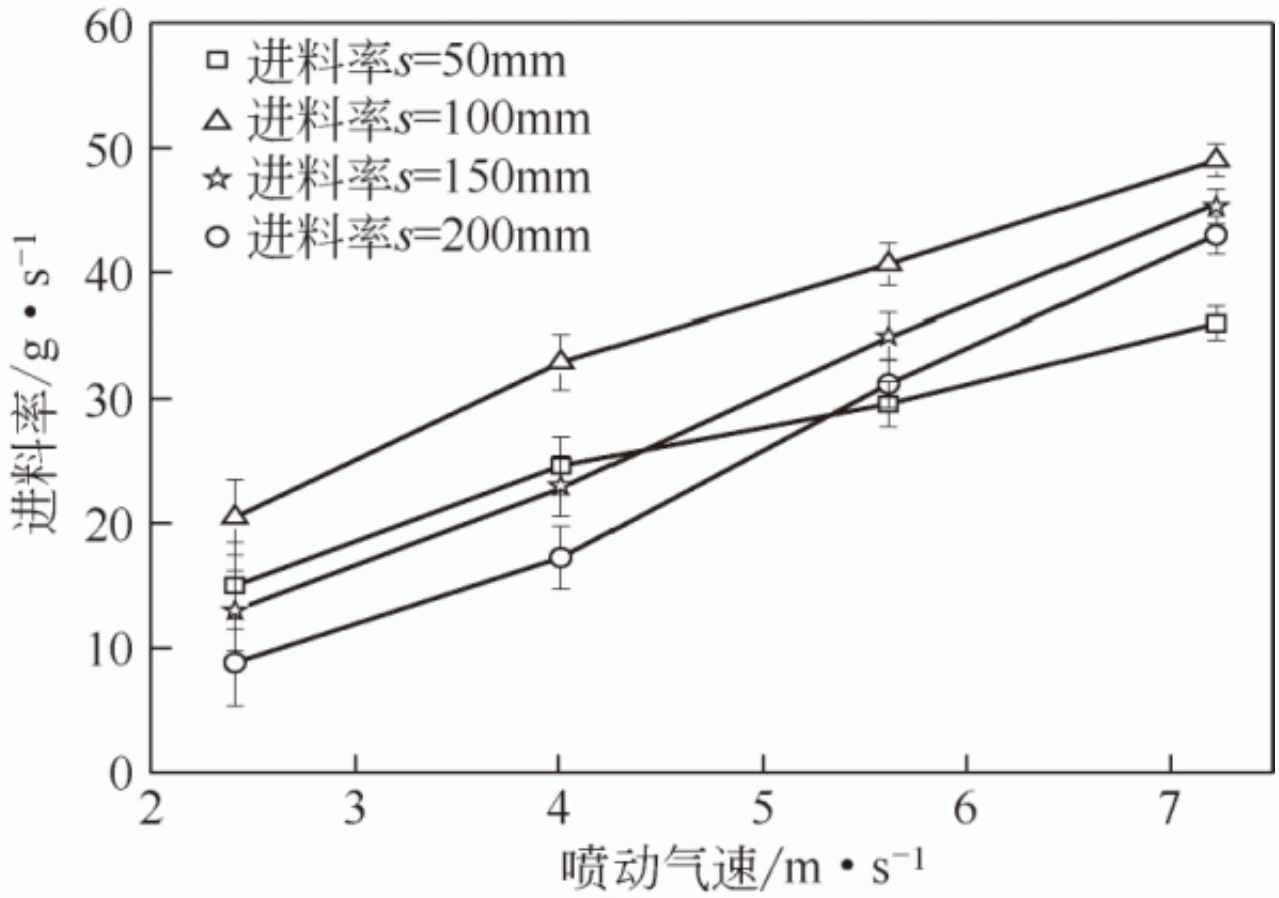

图4　有效喷射距离对进料率影响

(d_p=30 ~ 120 目，d_1=21mm)

2.4流化气和喷动气双重作用对进料率的影响

固定流化气速为0.0354m/s，喷动气速对进料率影响如图5所示。从图5可以看出，随着喷动气速的增加，输料率快速增加，固气比一直在降低。这主要是由于此时气体流速已经足够大，颗粒完全处于带状流或者悬浮流，而在当前的输

料管内径下，颗粒从进料仓进入输料管的速度不能大幅度提升，使得气流过剩。对比图5和图4，可以看出流化气的加入使得进料率增加，进料率波动降低。s=50mm时，进料率增加34.4%～101.8%；s=100mm时，进料率增加24.5%～76.6%。

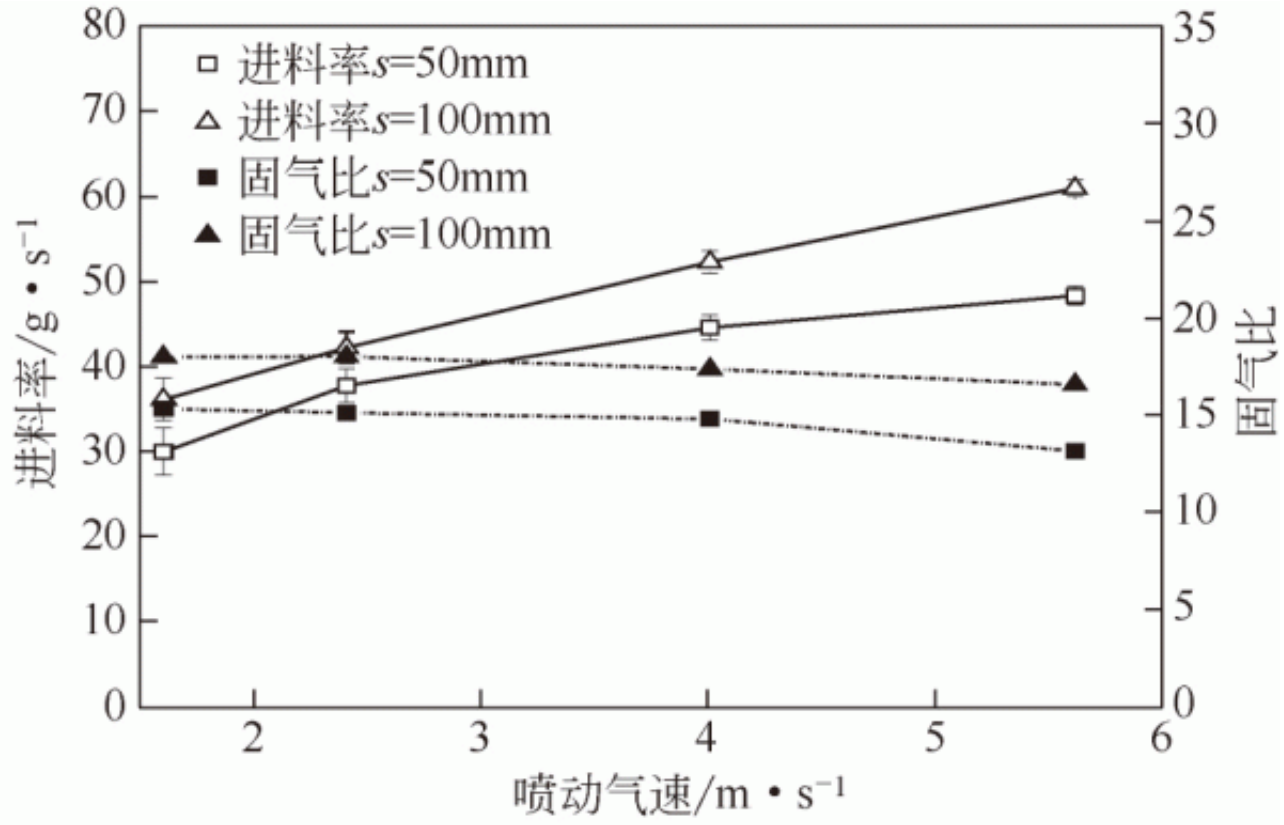

图5　喷动气速对进料率影响

(d_p=30～120目，d_1=21mm，s=100mm)

2.5输料管内径对进料率的影响

固定流化气速为0.0354m/s，研究不同输料管内径下喷动气速对进料率的影响，见图6。从图6可以看出，在输料管内径为21mm、24mm、29mm时，进料率均随着喷动气速的增加而增加，固气比随着喷动气速的增加而降低，这与图5的结论一致。在同样的喷动气速下，输料管内径越大，进料率越大，并且固气比随着喷动管内径的增加而增大。这是由于当气体流速相同时，管径越大，物料的流速越低，气体所携带的生物质颗粒的质量流量则越高，气体利用效率提高，所以进料率就越大，固气比就越高[25]。因此，适当增加输料管直径，降低管内气体与物料的流动速度，可以有效地降低气体消耗，提高输送固气比。

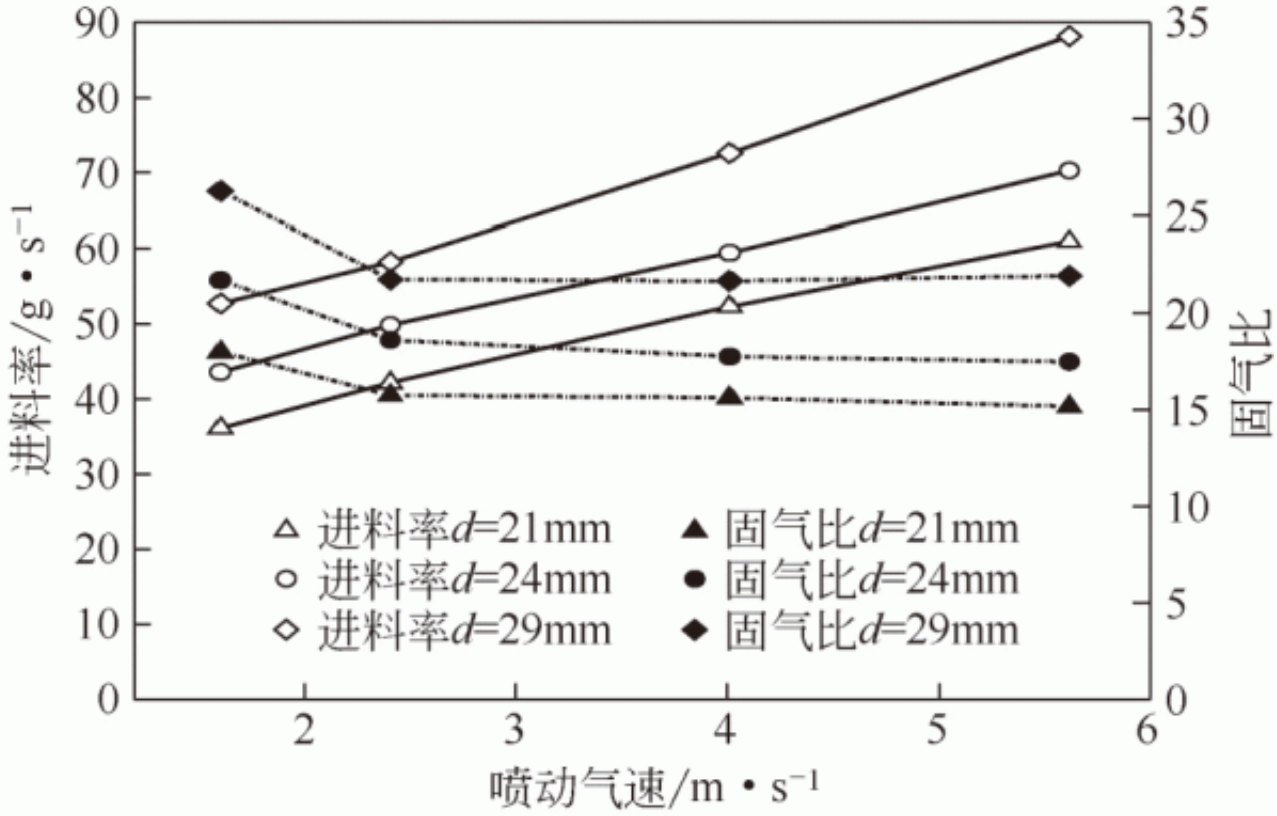

图6 输料管内径进料率影响

(d_p=30～120目，d_1=21mm，s=100mm)

2.6落叶松颗粒粒径对进料率的影响

固定流化气速为0.0354m/s，落叶松颗粒粒径对进料率的影响如图7所示。从图7可以看出，同样的喷动气流速下，随着物料粒径的减小，进料率减小。这是由于流体与固体颗粒之间有相对运动时，发生动量传递，流体对颗粒表面有曳力，随着粒径的减小，流体对颗粒的曳力减小，颗粒跟随性降低，从而引起进料率的减小。

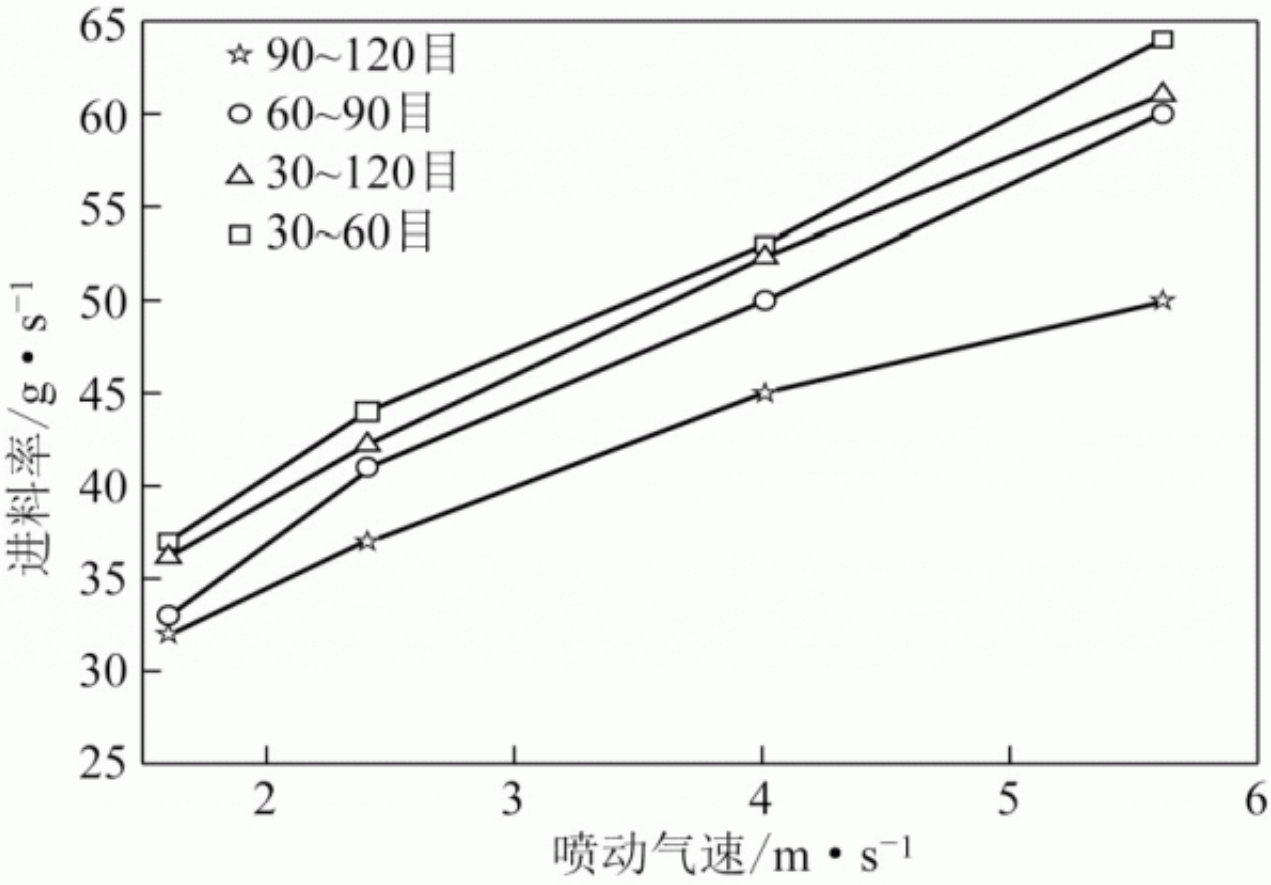

图7　落叶松颗粒粒径对进料率的影响

（d_1=21mm，s=100mm）

3生物质进料率回归模型建立及试验验证

生物质的进料率m_s主要受喷动气速v_1、流化气速v_2、输料管内径d_1、有效喷射距离s和落叶松颗粒粒度d_p的影响，对其进行多元线性回归分析，得到 $m_s=2.52496d_1+6.14086v_1+580.19479v_2+0.02462s+36.68102d_p-65.64094$。其中，相关系数$R^2=0.95208$，说明该关联式较好地反应了进料率与各因素之间的关系，可利用该关联式预测不同试验条件下落叶松颗粒的进料率。

进一步开展试验来验证模型的正确性，测试不同流化气速、喷动气速、输料管内径等条件下生物质进料率，将其与试验值对比，结果如图8所示。从图8可以看出，预测值与试验值吻合度较高，误差在±10.2%以内，说明该模型可以预测给定试验条件下的进料率。

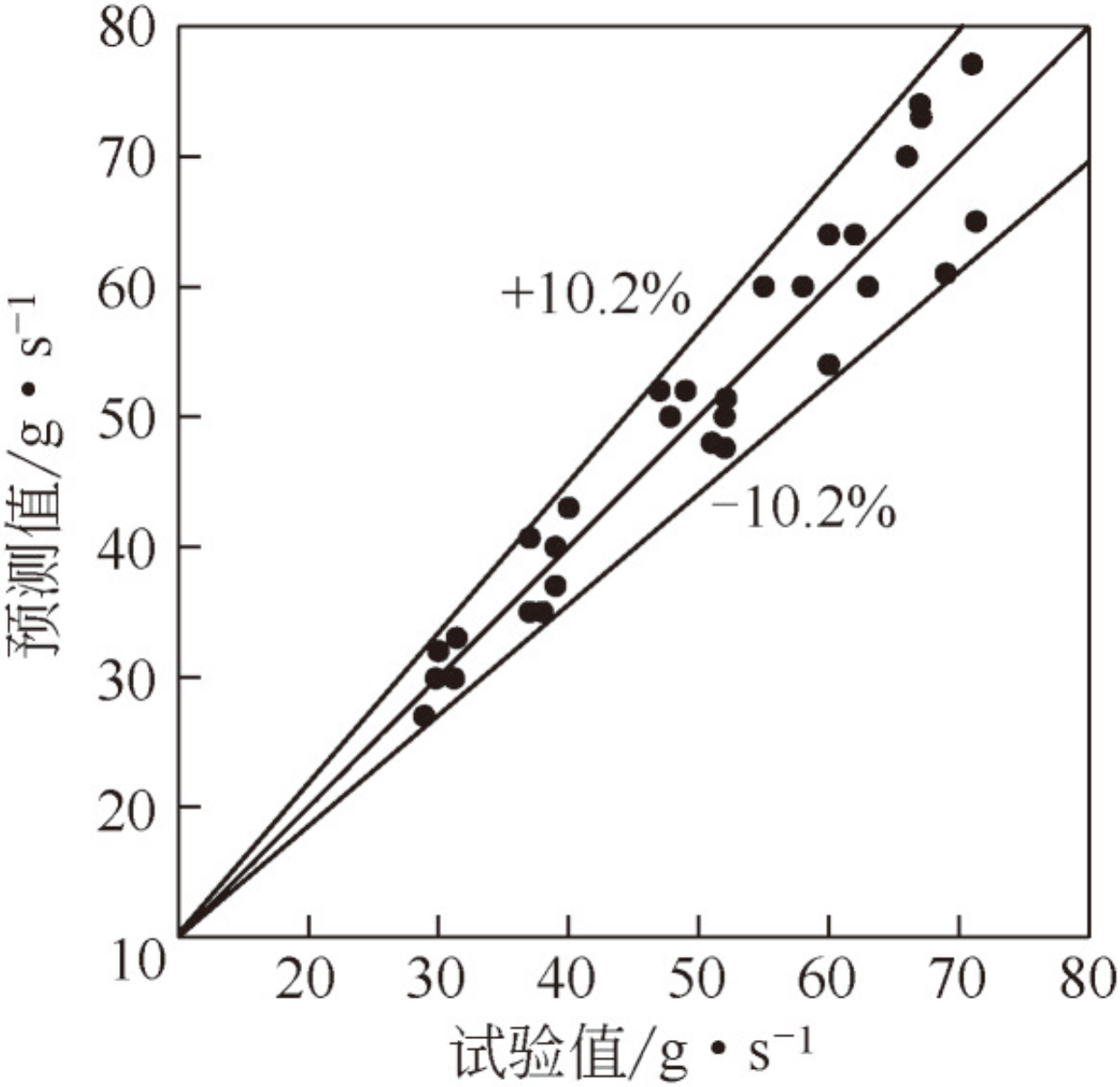

图8　试验值与预测值结果比较

4结论

在双仓式气力输送喂料装置中研究了流化气速、喷动气速、有效喷射距离、输料管内径、生物质颗粒粒径对进料率的影响，得到如下结论。

（1）生物质的进料率随流化/喷动气速的增加而增加，固气比在通入流化气/喷动气时，随着流化气速/喷动气速的增加先增大后减小。进料仓内通入喷动气更有利于提高物料的进料率，通入流化气更有利于提高进料的稳定性和连续性。

（2）有效喷射距离过远或过近都会造成进料率的下降，当有效喷射距离为100mm时，进料率最大。在不同有效喷射距离下，进料均随着喷动气速的增加而增大，固气比随之减小。

（3）在不同输料管内径下，进料率均随着喷动气速的增加而增加，固气比随着喷动气速的增加而降低。在同样的喷动气速下，生物质的进料率和固气比随着输料管内径的增大而增大。

（4）生物质的进料率随着颗粒粒径的增大而增大，当落叶松颗粒为30～60目、60～90目、30～120目时，粒径变化对进料率的影响较小。当粒径为90～120目时，进料率降低较大。

（5）建立了生物质进料率与喷动气速、流化气速、输料管内径、有效喷射距离和生物质颗粒粒径之间的多元线性回归模型，试验结果验证了该模型的可靠性。

参考文献

[1] DAI J, CUI H, GRACE J R. Biomass feeding for thermochemical reactors[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(5): 716-736.

[2] BERRUTI F M, BRIENS C L. Novel intermittent solid slug feeder for fast pyrolysis reactors: fundamentals and modeling[J]. Powder Technology, 2013, 247(10): 95-105.

[3] BOATENG, AKWASI A , DAUGAARD, et al. Bench-scale fluidized-bed pyrolysis of switchgrass for bio-oil production[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(7): 1891-1897.

[4] LAPPAS A A, DIMITROPOULOS V S, ANTONAKOU E V, et al. Design, construction, and operation of a transported fluid bed process development unit for biomass fast pyrolysis: effect of pyrolysis temperature[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47 (3): 742-747.

[5] ZHENG J L. Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: yields and related properties and improvement of the pyrolysis system[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2007, 80(1): 30-35.

[6] 王建豪, 贺春辉, 倪红亮, 等. 不同配比生物质粉与煤粉混合物的高压密相气力输送压降实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 48

(23): 112-118.
WANG Jianhao, HE Chunhui, NI Hongliang, et al. Experimental study on dense phase pneumatic conveying of pulverized blending of biomass and coal at high pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 48(23): 112-118.

[7] 吴煜, 司慧, 王文亮, 等. 木质生物质热解二级脉冲式气力进料试验研究[J]. 中国粉体技术, 2017, 23(4): 67-71.
WU Yu, SI Hui, WANG Wenliang, et al. Study on two-stage feeding using pulse pneumatic conveying system for woody biomass fast pyrolysis[J]. China Powder Science and Technology, 2017, 23(4): 67-71.

[8] SCOTT D S, PISKORZ J. Low rate entrainment feeder for fine solids[J]. Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1982, 21(3): 319-322.

[9] YARGICOGLU E N, SADASIVAM B Y, REDDY K R, et al. Physical and chemical characterization of waste wood derived biochars[J]. Waste Manage., 2014, 26(6): 256-268.

[10] 张倩, 李志合, 李永军, 等. 旋转刮刀生物质粉喂料器的实验研究[J]. 农机化研究, 2013, 29(2): 214-216.
ZHANG Qian, LI Zhihe, LI Yongjun, et al. Characteristics of rotary blades feeder for biomass powder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 29(2): 214-216.

[11] 李永军, 易维明, 柏雪源, 等. 刮板式生物质粉喂料机的喂料特性分析[J]. 太阳能学报, 2014, 35(2): 355-359.
LI Yongjun, YI Weiming, BAI Xueyuan, et al. Characteristics of scraper feeder for biomass power[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2014, 35(2): 355-359.

[12] 潘响明, 郭晓镭, 陆海峰, 等. 不同载气供料对工业级竖直上升管粉煤气力输送的影响[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1169-1178.
PAN Xiangming, GUO Xiaolei, LU Haifeng, et al. Effect of feeding gas on pneumatic conveying of pulverized coal in industrial-scale vertical pipe[J]. CIESC Journal, 2016, 67(4): 1169-1178.

[13] 何家斌, 冉煜, 段广彬, 等. 正压开放式气力输送水泥的流动特性[J]. 中国粉体技术, 2016(5): 89-92.
HE Jiabin, RAN Yu, DUAN Guangbin, et al. Flow characteristics for pneumatic conveying cement in positive pressure open type system[J]. China Powder Science and Technology, 2016(5): 89-92.

[14] 王明旭, 秦超, 李永祥, 等. 气力输送过程中粮食颗粒的输送特性研究[J]. 农机化研究, 2014(9): 18-22.
WANG Mingxu, QIN Chao, LI Yongxiang, et al. Study on transport characteristics of grain particles in pneumatic conveying[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(9): 18-22.

[15] 杨腾. 石灰石粉密相气流输送中试研究[J]. 化工进展, 2003, 22(11): 1213-1216.
YANG Teng. Pneumatic conveying research of limestone-powder in dense phase[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2003, 22(11): 1213-1216.

[16] 荆荣鹤, 王晓宁, 任芳. 气力变压输送能耗研究[J]. 化工进展, 2011, 30(s1): 525-528.
JING Ronghe, WANG Xiaoning, REN Fang. Study on the energy loss in the pressure change of pneumatic conveying[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(s1): 525-528.

[17] MOLINDER R, WIINIKKA H. Feeding small biomass particles at low rates[J]. Powder Technology, 2015, 49(9): 240-246.

[18] WEN C Y, SIMONS H P. Flow characteristics in horizontal fluidized solids transport[J]. AIChE Journal, 1959, 5(2): 263-267.

[19] MASSIMILLA L, BETTA V, ROCCA C D. A study of streams of solids flowing from solid-gas fluidized beds[J]. AIChE Journal, 1961, 7(3): 502 - 508.

[20] SURI A, HORIO M. A novel cartridge type powder feeder[J]. Powder Technology, 2009, 189(3): 497-507.

[21] WANG Xiao, SI Hui. Conveying characteristics of dual pneumatic feeder used for biomass pyrolysis[J]. Bioresources, 2017, 12(3): 5970-5983.

[22] 董卫宾, 郭晓镭, 龚欣, 等. 上出料系统粉煤密相气力输送特性及其与下出料系统的比较[J]. 化工学报, 2011, 62(7): 1989-1997.
DONG Weibin, GUO Xiaolei, GONG Xin, et al. Characteristic of top discharge blow tank conveying system and comparison with bottom discharge blow tank conveying system[J]. CIESC Journal, 2011, 62(7): 1989-1997.

[23] WYPYCH P W, YI J . Minimum transport boundary for horizontal dense-phase pneumatic conveying of granular materials[J]. Powder Technology, 2003, 129(1/2/3): 111-121.

[24] 王思佳, 靳世平, 黄芬霞, 等. 生物质粉末气力输送特性试验研究[J]. 工业加热, 2016, 45(6): 45-48.
WANG Sijia, JIN Shiping, HUANG Fenxia, et al. Experimental study on characteristics in pneumatic conveying of biomass powder[J]. Industrial Heating, 2016, 45(6): 45-48.

[25] 龚欣, 郭晓镭, 代正华, 等. 高固气比状态下的粉煤气力输送[J]. 化工学报, 2006, 57(3): 640-644.
GONG Xin, GUO Xiaolei, DAI Zhenghua, et al. High solids loading pneumatic conveying of pulverized coal[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2006, 57(3): 640-644.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/174434.html