

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.20190457

单一尺寸圆柱颗粒填充床的阻力特性

张承全, 高军, 吕立鹏, 贺廉洁

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 200082)

摘要: 通过直径为 3、4 mm 不同长度的圆柱颗粒填充床的阻力特性实验, 研究了颗粒密度对填充床孔隙率的影响, 结合文献孔隙率数据修正了孔隙率模型使其在高球形度时预测更准, 分析了等效直径的计算方法对 Ergun 常数的影响, 得到圆柱颗粒填充床的阻力特性并与 Nemec 和 Wu 的阻力预测模型进行对比, 提出新的拟合方法对 Ergun 常数进行拟合。结果表明: 颗粒密度在 1156~7947 kg/m³ 范围内对填充床的孔隙率没有影响; 结合文献数据得到圆柱颗粒填充床的孔隙率修正模型; 文献中预测不同 L/D 的圆柱颗粒堆积床的阻力时结果相差较大, Nemec 模型要比 Wu 模型预测准确度高, 但也不适用所有 L/D 下的阻力预测; 结合圆柱颗粒填充床孔隙率提出新的拟合方法, 拟合 Ergun 常数时, 采用 d_{ep} 作为等效直径的拟合优度最高; 提出新的 Ergun 常数表达式, 适用于圆柱直径 3~4 mm, $L/D=1\sim10$ 的圆柱颗粒, 相比于 Nemec 模型其 R^2 更高, 适用范围更明确, 因此实用性更强。

关键词: 颗粒物料; 填充床; 多孔介质; 压降; 圆柱颗粒

中图分类号: X 511

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2019) 11-4181-10

Resistance characteristics of bed packed with mono-size cylindrical particles

ZHANG Chengquan, GAO Jun, LYU Lipeng, HE Lianjie

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200082, China)

Abstract: The effect of particle density on the porosity of packed bed was studied by the experiment of the resistance characteristics of packed bed with cylindrical particles of different lengths of 3 mm and 4 mm. According to the experimental results, the following conclusions can be drawn that the porosity of the packed bed of cylindrical particles is independent of the particle density and is only related to the aspect ratio of the cylindrical particles. The modified model of the porosity of cylindrical particles packed bed was developed to make the prediction more accurate at high sphericity. The existing research results still have contradictions in predicting the cylindrical particle packed bed under different L/D values. And the Nemec model has higher prediction accuracy than the Wu model. When d_{ep} is used as the equivalent diameter, the R^2 of Ergun constants are 0.92(C_1) and 0.98(C_2), respectively, which is highest compared with that of other equivalent diameters.

Key words: granular materials; packed bed; porous media; pressure drop; cylindrical particles

引言

大气中的挥发性有机物(VOCs)对植物和动物

生命造成严重伤害,并且影响人类健康例如刺激眼睛、引起呼吸道问题、引发癌症等^[1-2]。作为有机溶剂应用于诸如喷涂、家具等行业的 VOCs 可占大气

收稿日期: 2019-05-05 修回日期: 2019-06-18

通信作者: 高军(1977—),男,博士,教授, gaojun-hvac@tongji.edu.cn

第一作者: 张承全(1989—),男,博士研究生, 1162990559@qq.com

引用本文: 张承全, 高军, 吕立鹏, 贺廉洁. 单一尺寸圆柱颗粒填充床的阻力特性[J]. 化工学报, 2019, 70(11): 4181-4190

Citation: ZHANG Chengquan, GAO Jun, LYU Lipeng, HE Lianjie. Resistance characteristics of bed packed with mono-size cylindrical particles[J]. CIESC Journal, 2019, 70(11): 4181-4190

VOCs 排放源的 35%~40%^[3]。在上述行业中,活性炭、分子筛吸附是最常见的 VOCs 处理手段,因而准确预估吸附剂颗粒填充床的压降十分重要。吸附剂颗粒一般分为球形和圆柱形。经多位学者验证^[4-7],在预测球形颗粒填充床的阻力时,Ergun 方程^[8]能够满足工程精度要求,其表达式如下

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{C_1 \mu (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} v_s + \frac{C_2 \rho (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} v_s^2 \quad (1)$$

采用修正的颗粒物 Reynolds 数(Re_p)和 Galileo 数(Ga),可得 Ergun 方程的无量纲形式^[9],其表达式如下

$$\frac{\Delta P/L}{\rho g} = \psi = C_1 \frac{Re_p}{Ga} + C_2 \frac{Re_p^2}{Ga} \quad (2)$$

$$Re_p = \frac{\rho v_s d_p}{\mu (1 - \varepsilon)} \quad (3)$$

$$Ga = \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^2 g \left(\frac{d_p \varepsilon}{1 - \varepsilon} \right)^3 \quad (4)$$

Ergun^[8]完成一系列球形、圆柱颗粒以及固体碎片填充床单相流阻力实验后提出 $C_1=150$ 、 $C_2=1.75$,但是 Ergun 方程仅适用于球形度接近 1 的颗粒(即类似于球形颗粒)填充床的阻力预测^[10-11]。而非球形固体颗粒的多孔介质中的单相流动的研究对于农业、生物医学、机械和化学工程及石油和食品工业等许多工程应用也具有重要意义^[12-13],因此准确预测非球形颗粒填充床的阻力十分重要。圆柱形颗粒在颗粒应用领域占比达 2/3^[14-15],故本文以圆柱形颗粒为研究对象分析非球形颗粒填充床中的单相流阻力特性。

为预测单相流通过非球形颗粒填充床的阻力,普遍的做法是采用确定等效直径结合修正 Ergun 常数的方法来发展 Ergun 方程。 d_{sd} (Sauter mean diameter)作为非球形颗粒的等效直径应用于 Ergun 方程被多位学者^[6,11,14,16-19]采纳,其定义为与所研究颗粒具有相同体积/表面积的球形颗粒的直径,即 $d_{sd}=6V_p/A_p$ 。根据 d_{sd} 和球形度 φ ^[20],还有两种等效直径,分别为 d_{eq} 和 d_{vs} ;前者^[13]定义为 d_{sd} 和 φ 的乘积,后者^[6,9,14,17-18]定义为 d_{sd} 和 φ 的比值。

通过实验研究单相流通过非球形颗粒填充床的阻力是获取 Ergun 常数最直接有效的手段。当采用 d_{sd} 时,Leva^[19]得到的 Ergun 常数为 $C_1=200$ 、 $C_2=1.75$;Handley 等^[16]的研究结果为 $C_1=368$ 、 $C_2=1.68$;MacDonald 等^[6]提出 $C_1=180$,针对光滑颗粒 $C_2=1.8$,粗糙颗粒 $C_2=4$ 。Clavier 等^[21]将 d_{sd} 应用于黏性能量损失项, d_{eq} 应用于惯性能量损失项,得出 $C_1=181$ 、 $C_2=$

1.63。Ozahi 等^[18]采用 d_{vs} 作为等效直径得到 $C_1=160$ 、 $C_2=1.61$ 。以上学者采用的颗粒不仅包含圆柱颗粒,且采用的圆柱颗粒尺寸不同。通过上述文献分析,显然不同尺寸的圆柱颗粒对应的 Ergun 常数不同。采用固定值作为 Ergun 常数难以满足更广的应用范围,因此选用表征圆柱颗粒形状特性和堆积特性的参数表达式来替代固定值 Ergun 常数就非常有必要了。

Foumeny 等^[14]选用高径比 $L/D=1$, $d_{sd}=3\sim 14$ mm 的五种尺寸的圆柱颗粒和 $L/D=0.5\sim 2$, $d_{sd}=7.5\sim 18.12$ mm 的八种尺寸的圆柱颗粒作为研究对象,考虑到床体直径的影响将 Ergun 方程以摩擦阻力系数的形式加以分析得出 $C_1=211$, $C_2=3.81-5.265/(d_i/d_{sd})-7.047/(d_i/d_{sd})^2$ 。Nemec 等^[11]选用尺寸为 3.2 mm×4.2 mm(直径×高)、1.6 mm×4.7 mm 和 1.3 mm×7.5 mm 的三种圆柱颗粒并结合 Pahl^[22]选用高径比为 0.37~3.81 的五种圆柱颗粒的实验结果和 Reichelt^[23](圆柱颗粒高径比为 1)及 England 等^[24](圆柱颗粒高径比为 1)的实验结果,以球形度为自变量拟合出圆柱颗粒填充床的 Ergun 常数表达式 $C_1=150/\varphi^{3/2}$, $C_2=1.75/\varphi^{4/3}$,拟合公式的 R^2 值分别为 0.413 和 0.075。为了描述填充床结构的复杂性 with 物理意义,Yu 等^[25]提出扭曲度的概念来表征。Wu 等^[26]基于喉孔模型和毛细管模型结合扭曲度推导出新的阻力预测模型以 $C_1=72\tau$, $C_2=3\tau(3/2+1/\beta^4-5/2\beta^2)/4$ 代替 Ergun 常数并以直径为 10 mm 的玻璃球填充床阻力实验进行验证。Park 等^[27]修正了 Wu 的模型,提出 Ergun 常数 $C_1=36k_0\tau^2$ 以 d_{eq} 作为等效直径预测非球形颗粒填充床的单向流阻力,并以尺寸为 1.98 mm×2.04 mm、1.98 mm×4.95 mm、4.98 mm×5.04 mm 和 4.98 mm×13.9 mm 的圆柱颗粒的阻力实验进行验证。

上述以表达式来代替 Ergun 常数的研究中,Nemec 等得到的拟合度过低,而 Wu 等没采用圆柱颗粒填充床进行验证,Park 等仅采用四种尺寸的圆柱颗粒,且 $L/D=1\sim 2.8$ 范围较窄。上述研究并未明确其模型的应用范围,因此在选用预测模型时仍不能根据圆柱颗粒尺寸确定合适的预测模型,而且在选取等效直径时也未给出原因,并未对不同等效直径会对模型造成的影响进行分析。为得到 L/D 应用范围更广的圆柱颗粒填充床的阻力预测模型,本文以直径 3 mm、 $L/D=1\sim 10$ 和直径 4 mm、 $L/D=1\sim 7$ 共 15 种圆柱形颗粒为研究对象分析圆柱颗粒填充床中单相流的阻力特性,确定圆柱直径 $D=3\sim 4$ mm 不

同 L/D 下的Ergun常数,并分析不同等效直径的选取对Ergun常数的影响,提出孔隙率结合Ergun常数拟合的方法,提出 R^2 更高的Ergun常数表达式。

1 实验材料和方法

1.1 材料

为保证圆柱颗粒尺寸的精确度与一致性,选取不锈钢圆柱条和PVC圆柱条作为填充颗粒。不锈钢圆柱条由东莞市朗特金属材料有限公司切工加工,直径 $D=3\text{ mm}$ 、 $L/D=1\sim 10$ 和 $D=4\text{ mm}$ 、 $L/D=1, 2, 3, 5, 7$,直径公差为 $\pm 0.02\text{ mm}$,长度公差为 $\pm 0.05\text{ mm}$,密度 $(7947\pm 17)\text{ kg/m}^3$ 。PVC圆柱条由东莞市画生塑料材料有限公司切割加工,直径 $D=3\text{ mm}$ 、 $L/D=3, 5, 6, 7, 9$,直径公差为 $\pm 0.04\text{ mm}$,长度公差为 $\pm 0.1\text{ mm}$,密度 $(1156\pm 7)\text{ kg/m}^3$ 。所采用材料的三种等效直径如表1、表2所示。

表1 3 mm直径圆柱颗粒的三种等效直径
Table 1 Three equivalent diameters of cylindrical particles with diameter of 3 mm

D/mm	L/mm	d_{st}/mm	d_{vs}/mm	d_{eq}/mm
3	3	3.00	3.43	2.62
3	6	3.60	4.33	3.00
3	9	3.86	4.95	3.00
3	12	4.00	5.45	2.94
3	15	4.09	5.87	2.85
3	18	4.15	6.24	2.77
3	21	4.20	6.57	2.69
3	24	4.24	6.87	2.61
3	27	4.26	7.14	2.54
3	30	4.29	7.40	2.48

表2 4 mm直径圆柱颗粒的三种等效直径
Table 2 Three equivalent diameters of cylindrical particles with diameter of 4 mm

D/mm	L/mm	d_{st}/mm	d_{vs}/mm	d_{eq}/mm
4	4	4.00	4.58	3.49
4	8	4.80	5.77	3.99
4	12	5.14	6.60	4.01
4	20	5.45	7.83	3.80
4	28	5.60	8.76	3.58

1.2 测试仪器

2000 ml量筒(精度为20 ml,高度490 mm,直径95 mm,直径与填充床接近,测试孔隙率时堆积状态与阻力测试时堆积状态类似);电子分析天平(精度

为0.5 g);高精度电子秤(精度为0.1 g);质量流量控制器(量程750 SLM,准确度 $\pm 2\%$ F.S),D07-60B/60BM,北京七星华创电子股份有限公司;便携式微压差计(精度1 Pa),KIMO MP110,法国凯茂;温湿度自记仪(精度 0.1°C , $0.1\%\text{RH}$),WZGYA-1A,北京天建华仪科技发展有限公司。

1.3 圆柱颗粒填充床阻力测试装置

颗粒填充床阻力测试装置如图1所示,它由空气压缩机、质量流量控制器、颗粒填充床(内径0.1 m,这是为了避免壁面效应,需使床直径/颗粒直径 > 10 ^[17,28])及阻力温度测量装置等部分组成,其中空气压缩机的最大流量为400 SLM,最高压力为0.7 MPa。

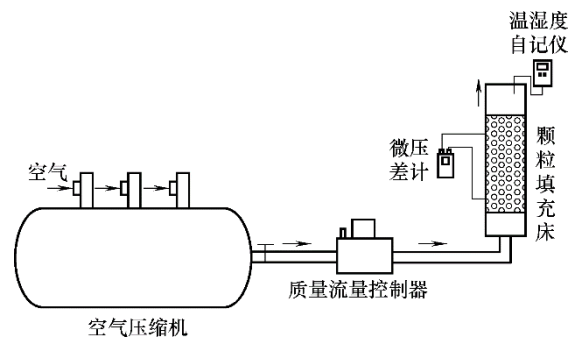


图1 颗粒填充床阻力测试装置

Fig.1 Particle packing bed resistance test apparatus

1.4 圆柱颗粒填充床孔隙率及阻力实验

(1)孔隙率 ε 的测量:式(1)表明孔隙率对阻力的影响非常显著。为保证孔隙率测量的准确性,根据式(5)、式(6)本文采取两种测量方法测量圆柱颗粒填充床的孔隙率。

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_b}{V_b \rho_p} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{pore}}}{V_b} \quad (6)$$

根据式(5),用量筒量取体积为 V_b (本文取2000 ml)的每种尺寸的圆柱颗粒,然后称重得到堆积质量 m_b ,之后计算可得孔隙率,将圆柱颗粒从量筒中倒出,再重复填充测量计算4次;根据式(6),将圆柱颗粒倒入量筒中至2000 ml刻度线处,称重,再倒入水至水平面的凹液面与2000 ml刻度线平齐,再称重,前后两次称重读数差即为水质量,根据水密度计算可得该部分水的体积,即为孔隙体积 V_{pore} ,最后计算出孔隙率并与第一种方法结果对比,此方法为水置换法^[14,18,29]。

(2)阻力实验:根据测得的颗粒堆积密度,量取

所需质量的圆柱颗粒,采用随机松散填充法^[20]倒入填充床中,这种方法的可重复性比较高^[20,30-31],填充高度为 0.3 m,测量段为中间的 0.2 m,然后开启空气压缩机,当压力表读数达到质量流量控制器的工作压力时,开启质量流量控制器并调至所需流量,待微压差计读数稳定后,读取 10 个数据求平均值即为所测阻力,最后在出口处测量气体的温度并倒出颗粒,该实验需重复填充测试 3 次以上。

2 实验结果与讨论

2.1 圆柱颗粒孔隙率

2.1.1 颗粒密度对孔隙率的影响 从图 2 可知,采用直径称重[式(5)],曲线 m0]和排水法[式(6),曲线 m1]测出来的孔隙率非常接近,相对误差小于 1.4%,说明孔隙率测试结果的准确性。通过曲线 m0 与曲线 m1 的对比,说明在颗粒密度 1156~7947 kg/m³ 范围内,颗粒密度对孔隙率的影响非常小,常见的活性炭分子筛的密度与 PVC 颗粒接近^[3,32-36],不过因为不锈钢圆柱颗粒的尺寸精度与准确度更高,因此阻力实验以不锈钢圆柱颗粒为实验对象。

2.1.2 颗粒形状对孔隙率的影响 孔隙率是颗

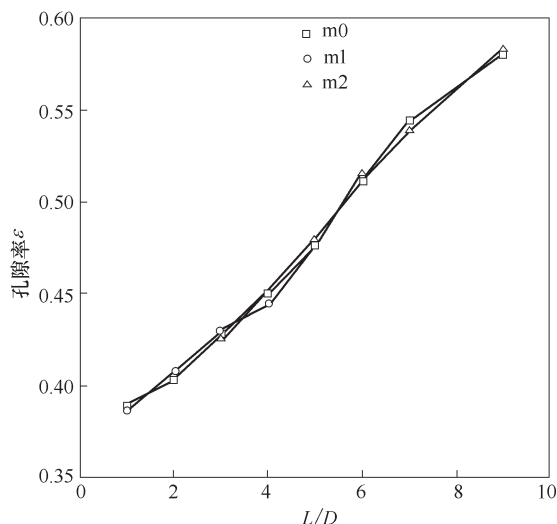


图 2 3 mm 不锈钢圆柱颗粒两种测量方法下的孔隙率及与 3 mm PVC 圆柱颗粒孔隙率的对比(曲线 m0 代表根据式(5)测得 3 mm 不锈钢圆柱颗粒孔隙率;曲线 m1 代表根据式(6)测得 3 mm 不锈钢圆柱颗粒孔隙率;曲线 m2 代表根据式(5)测得 3 mm PVC 圆柱颗粒孔隙率)

Fig.2 Porosity under two measurement methods for fixed bed packed with stainless steel cylindrical particles with diameter of 3 mm and comparison with porosity of PVC cylindrical particles with diameter of 3 mm

表 3 文献中圆柱颗粒堆积床孔隙率

Table 3 Porosity of cylindrical particle packed bed in literatures

文献	<i>D</i> /mm	<i>L</i> /mm	<i>L/D</i>	φ	ε
[27]	1.98	2.04	1.03	0.873	0.382
	1.98	4.95	2.50	0.805	0.389
	4.98	5.04	1.01	0.874	0.353
	4.98	13.9	2.79	0.789	0.395
[14]	3	3	1.00	0.874	0.36
	4	4	1.00	0.874	0.362
[11]	3.2	4.2	1.31	0.867	0.394
	1.6	4.7	2.94	0.782	0.437
	1.3	7.5	5.77	0.672	0.505
[13]	3	3	1.00	0.874	0.337
	3	6	2.00	0.832	0.37

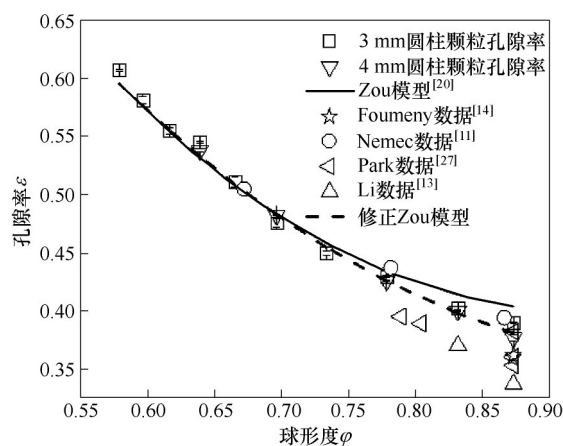


图 3 3 mm 与 4 mm 不锈钢圆柱颗粒的孔隙率

Fig.3 Porosity of fixed bed packed with stainless steel cylindrical particles with diameter of 3 mm or 4 mm

粒填充床的重要参数,准确预测孔隙率意义重大。如表 3 所示,现有阻力研究中涉及的圆柱颗粒的 L/D 范围较小,高 L/D 数据较少。图 3 汇总了文献中涉及的圆柱颗粒堆积床的孔隙率、本文实验数据以及 Zou 等^[20] 基于 $D=2$ mm、 $L/D=1\sim64$ 的圆柱木条填充实验提出的圆柱颗粒初始化孔隙率预测模型[式(7)]并给出修正的 Zou 模型,由图 3 可以发现:随着球形度减小,圆柱颗粒填充床的孔隙率变小;除 Park 的实验数据外,当 $L/D>1$ 时,Zou 模型预测的结果与本实验的结果及文献数据相对误差在 3% 以内;当 $L/D=1$ 时,Zou 模型预测值偏高,因此本文针对 Zou 模型进行修正[式(8)],使得在高球形度时,Zou 模型预测更加准确。

$$\ln \varepsilon = \varphi^{5.58} \exp[5.89(1 - \varphi)] \ln 0.40 \quad (7)$$

$$\ln \varepsilon = \varphi^{4.46} \exp[4.11(1 - \varphi)] \ln 0.35 \quad (8)$$

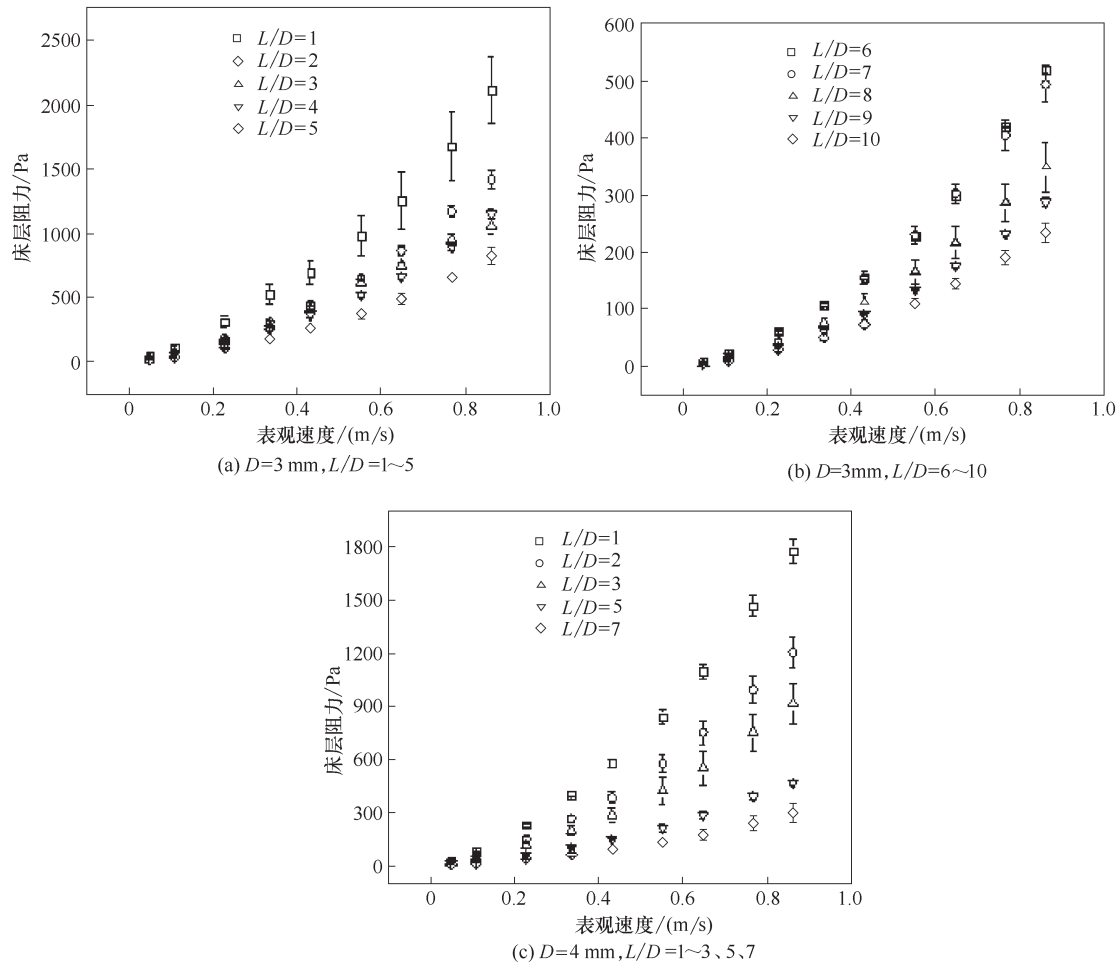


图4 直径为3 mm和4 mm的圆柱颗粒堆积床的阻力特性

Fig.4 Resistance characteristic of bed packed with cylindrical particles with diameters of 3 mm and 4 mm

2.2 圆柱颗粒阻力特性及与已有模型的对比

本文选取了直径 $D=3\text{ mm}$ 、 $L/D=1\sim10$ 和直径 $D=4\text{ mm}$ 、 $L/D=1\sim3, 5, 7$ 一共 15 种尺寸的圆柱颗粒填充进床内。所得阻力特性如图 4 所示, 同一直径下, 长度越长, 阻力越小; 同一 L/D 下, 直径越大, 阻力越小。为表征本实验所得的阻力特性曲线与现有模型的差异以及现有模型之间的差异, 本文采用平均相对误差作为评判指标, 每条曲线测试了 9 个数据点, 即取这 9 个数据点的相对误差的平均值作为评判指标。如图 5 所示, 其中 + 表示模型预测结果大于实验结果, - 表示模型预测结果小于实验结果。在本文实验涉及的圆柱颗粒尺寸范围内, 根据 Nemec 模型计算的阻力始终大于 Wu 模型的计算阻力, 并且随着 L/D 的增加, Wu 模型相对于 Nemec 模型的预测结果误差增大; 与实验结果相比, Wu 模型的结果始终小于实验结果, 且 Wu 模型预测不理想, 相对误差均在 15% 以上, 且仅在 $D=3\text{ mm}$ 、 $L/D=2$ 和 8 以及

$D=4\text{ mm}$ 、 $L/D=7$ 时, 相对误差在 25% 以内, 分别为 21.1%、23.9% 和 23.7%; 而 Nemec 模型在 L/D 较高 ($D=3\text{ mm}$ 、 $L/D\geq 8$ 和 $D=4\text{ mm}$ 、 $L/D=7$) 时预测结果大于实验结果, 在 L/D 较小时预测结果小于实验结果, 且在 $D=3\text{ mm}$ 、 $L/D=2, 6, 8, 9, 10$ 和 $D=4\text{ mm}$ 、 $L/D=7$ 时, 阻力计算误差在 15% 以内, 可认为预测准确。由上述分析可知, Nemec 模型比 Wu 模型的预测结果更为准确。这是因为 Wu 根据毛细管模型和喉管模型提出阻力预测公式仅采用直径为 10 mm 的球、等效直径为 1.41 mm 的三叶颗粒和等效直径为 1.26 mm 四叶颗粒进行验证, 并未采用圆柱颗粒进行验证, 且通过与本实验数据对比, Wu 模型并不适用于本实验涉及的圆柱颗粒尺寸下的阻力预测。而 Nemec 提出的 Ergun 常数表达式是根据真实的圆柱颗粒填充床实验数据拟合而来, 虽然 R^2 值较低, 却仍适用于一部分圆柱颗粒填充床的阻力预测; 同样因为 R^2 值太低, 并不是所有的情况都

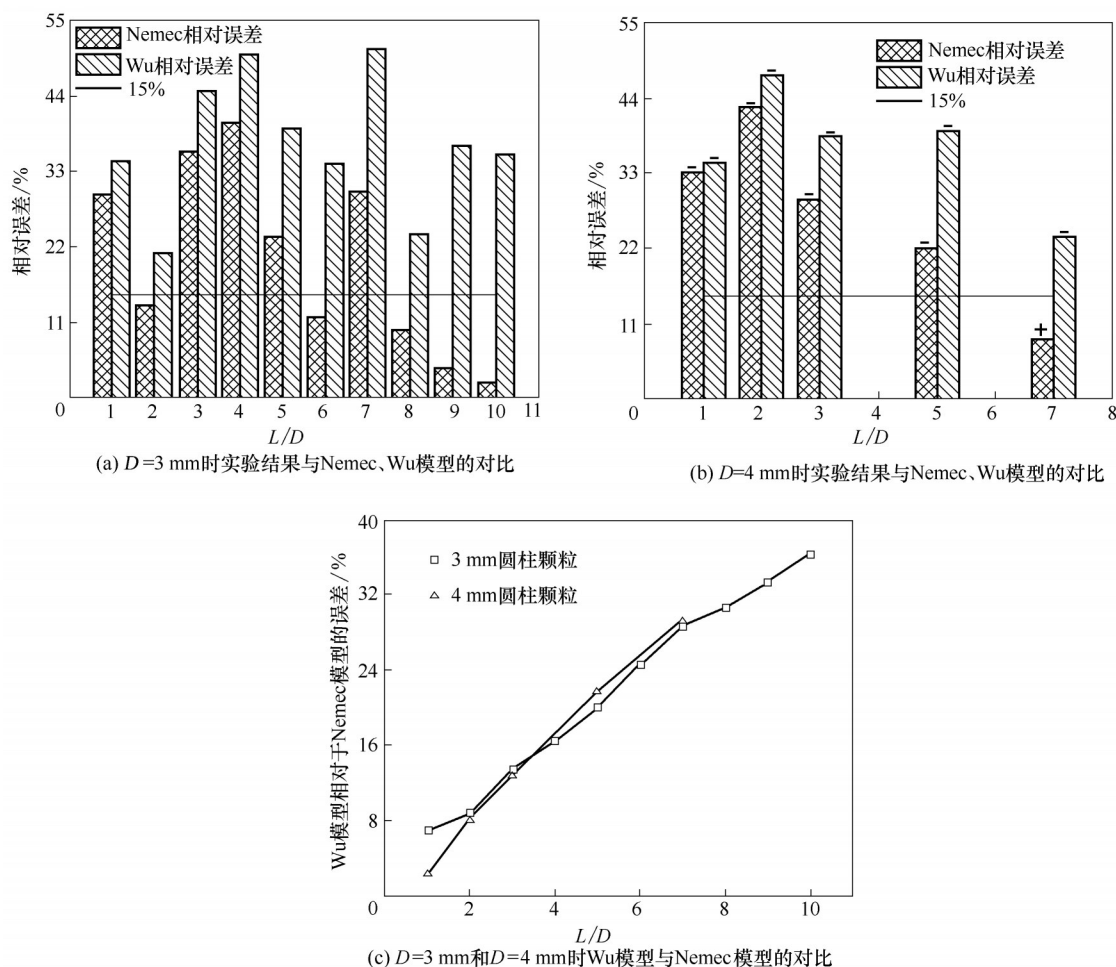


图 5 实验结果与现有模型的对比

Fig. 5 Comparison of experimental results with Nemec and Wu models

适用且难以确定适用范围。因此针对某一尺寸范围内提出新的预测模型或者对已有模型划分适用范围十分有必要。

2.3 等效直径对 Ergun 常数的影响

得到的新 Ergun 常数预测模型等效直径的选取十分重要,本文先采用和 Nemec 相同的分析方法,直接绘制出 Ergun 常数与 L/D (与球形度 φ 一一对应) 的关系,如图 6 所示。选取不同的等效直径, Ergun 常数差异非常大。仅从数值上考虑的话,选取 d_{cp} 作为等效直径,圆柱颗粒填充床的 Ergun 常数最接近 Ergun 模型,但是随着 L/D 变化, Ergun 常数变化也很剧烈,难以用固定值表征。从单调性上考虑,以上三种等效直径下的 Ergun 常数随着 L/D 的增长呈锯齿形变化,且直径取 3 mm 和 4 mm 的 Ergun 常数变化规律也不一致。因此难以直接拟合出拟合度较好的 Ergun 常数与 L/D 关系式,又因圆柱颗粒的球形度仅与 L/D 相关,

所以需从其他角度考虑 Ergun 常数与球形度的拟合关系。

根据式(1),除了颗粒直径外,表征颗粒堆积床的另一个重要物理量是孔隙率 ε ,因此本文结合孔隙率提出新的拟合方法:令 $\varepsilon_1=(1-\varepsilon)^2/\varepsilon^3$, $\varepsilon_2=(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$, 得到不同等效直径下 $\varepsilon_1 C_1-\varphi$ 和 $\varepsilon_2 C_2-\varphi$ 的关系。如图 7 所示,等效直径选取 d_{sd} 时,在 $L/D=3\sim 10$,即球形度 $\varphi=0.78\sim 0.58$ 时, $\varepsilon_1 C_1$ 与 φ 呈现单调关系,仅在 $\varphi=0.64$ 时 $\varepsilon_1 C_1$ 曲线有小幅波动;等效直径选取 d_{vs} 时, $\varepsilon_1 C_1$ 随着 φ 的增长,仍然呈现锯齿波动,但整体呈现增长趋势;等效直径选取 d_{cp} 时, $\varepsilon_1 C_1$ 与 φ 单调性较好,仅当 $D=3$ mm, $L/D=1$ 和 2 时, $\varepsilon_1 C_1-\varphi$ 曲线出现拐点。这三种等效直径下 $\varepsilon_2 C_2-\varphi$ 曲线的单调性都较好。由此可见采用新的拟合方式后, $f(C_1)/f(C_2)$ 与 φ 单调性大幅提高,使得高 R^2 的 Ergun 常数表达式的获取成为可能。本文从指数、线性、对数、幂函数中选取拟合优度最高的拟合公式列于表 4,由此可见

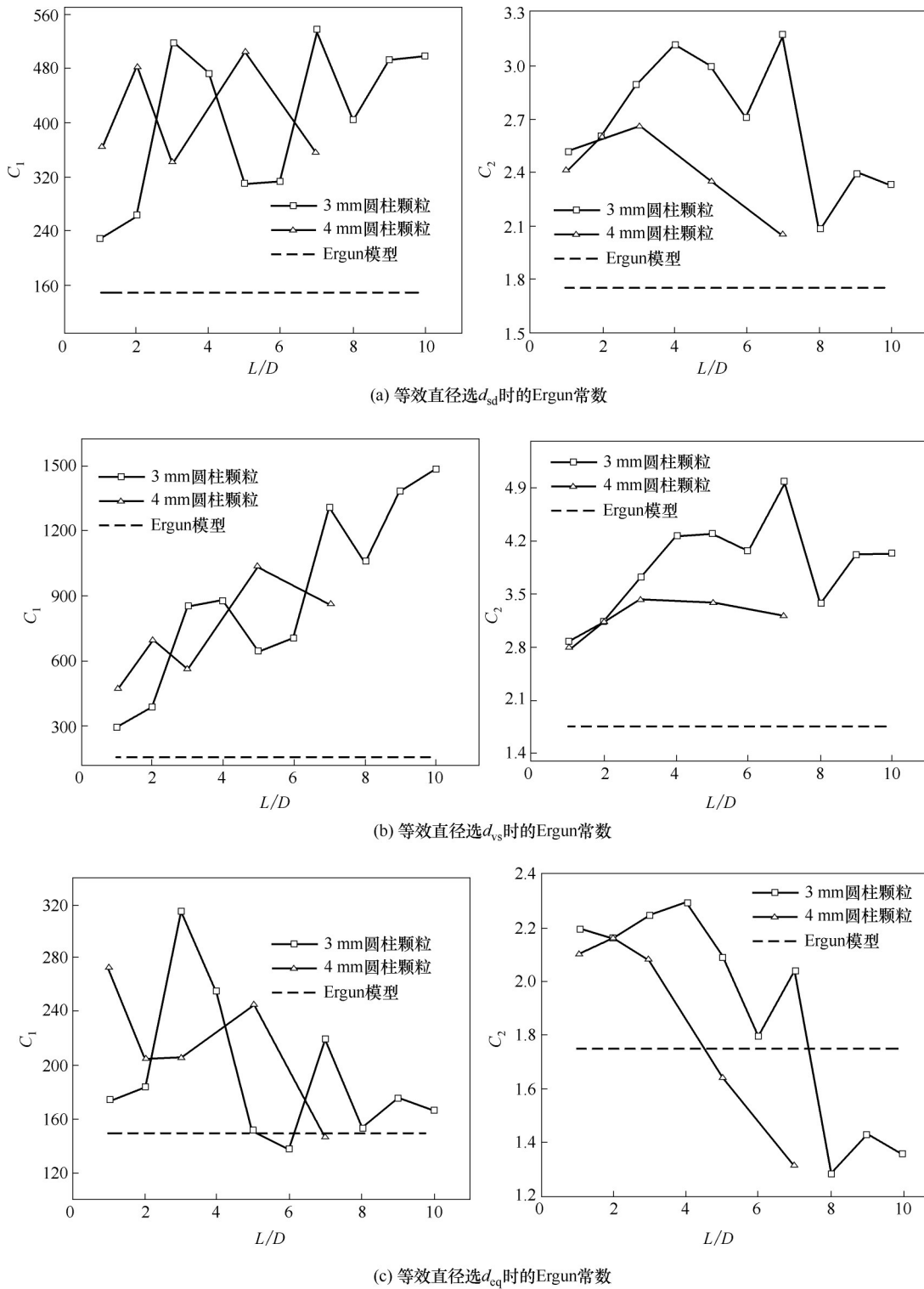


图6 选取不同等效直径时的Ergun常数

Fig.6 Ergun constants with different equivalent diameter

当选取 d_{ep} 作为等效直径时, $\varepsilon_1 C_1$ 、 $\varepsilon_2 C_2$ 与 φ 的拟合度最好,根据修正的Zou模型,可进一步得到Ergun常数 C_1 、 C_2 与球形度的关系表达式,如式(9)~式(11)所示。

$$\ln \varepsilon = \varphi^{4.46} \exp[4.11(1 - \varphi)] \ln 0.35 \quad (9)$$

$$C_1 = 4546.3 \varphi^{6.5462} \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)^2 \quad (10)$$

$$C_2 = (54.88 \ln \varphi + 30.072) \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon) \quad (11)$$

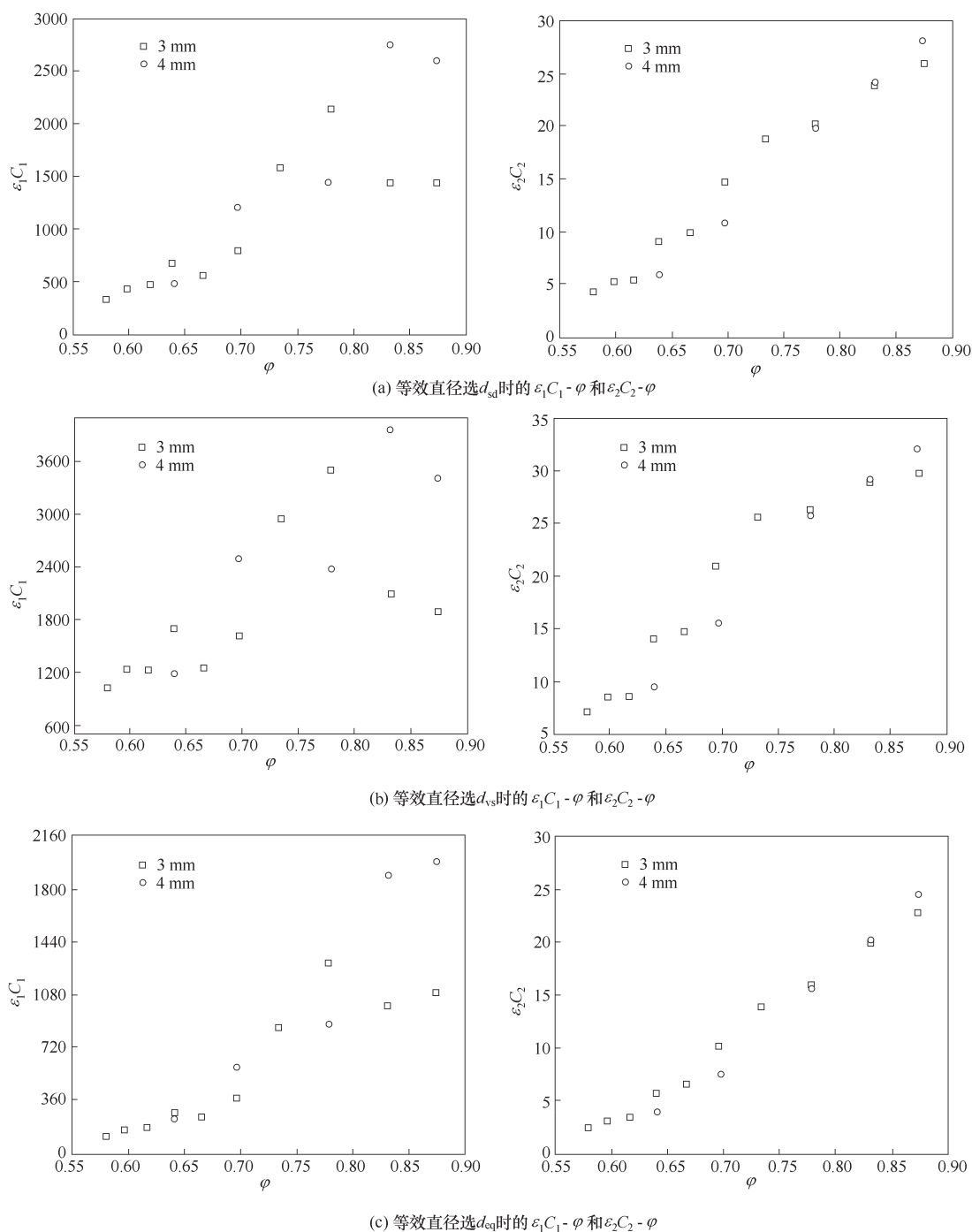


图 7 选取不同等效直径时的 $\varepsilon_1 C_1 - \phi$ 和 $\varepsilon_2 C_2 - \phi$

Fig.7 $\varepsilon_1 C_1 - \phi$ and $\varepsilon_2 C_2 - \phi$ with different equivalent diameter

3 结 论

本文通过单一尺寸圆柱颗粒填充床的阻力特性实验研究并分析现有阻力预测模型得到如下结论。

(1) 密度分别为 1156 kg/m^3 和 7947 kg/m^3 的颗粒填充床的孔隙率一致。

(2) 圆柱颗粒填充床的孔隙率仅与 L/D 有关, 即仅与 ϕ 有关, 与直径无关; 整合文献数据和实验数据, 对圆柱颗粒填充床的孔隙率模型进行修正, 得到如下孔隙率预测模型: $\ln \varepsilon = \phi^{4.46} \exp[4.11(1-\phi)] \times \ln 0.35$ 。

(3) 现有研究结果在不同 L/D 取值下在预测圆柱颗粒堆积床时仍存在矛盾的地方, Nemec 模型比

表4 三种等效直径下 $\varepsilon_1 C_1$ 和 $\varepsilon_2 C_2$ 与 φ 的拟合关系式Table 4 Fitting relationship between $\varepsilon_1 C_1$, $\varepsilon_2 C_2$ and φ under three equivalent diameters

等效直径	因变量	表达式	拟合优度 R^2
d_{sd}	$\varepsilon_1 C_1$	$\varepsilon_1 C_1 = 4546.3\varphi^{4.5462}$	0.8464
	$\varepsilon_2 C_2$	$\varepsilon_2 C_2 = 58.84 \ln \varphi + 34.988$	0.9772
d_{vs}	$\varepsilon_1 C_1$	$\varepsilon_1 C_1 = 4546.4\varphi^{2.5463}$	0.6335
	$\varepsilon_2 C_2$	$\varepsilon_2 C_2 = 62.891 \ln \varphi + 40.858$	0.9484
d_{ep}	$\varepsilon_1 C_1$	$\varepsilon_1 C_1 = 4546.3\varphi^{6.5462}$	0.9195
	$\varepsilon_2 C_2$	$\varepsilon_2 C_2 = 54.88 \ln \varphi + 30.072$	0.9823

Wu模型预测准确度要高。这是因为Wu模型仅用球形颗粒、三叶颗粒和四叶颗粒填充床阻力实验进行验证,并未用圆柱颗粒填充床进行验证,而Nemec采用真实的圆柱颗粒填充床实验数据进行拟合,必然满足部分尺寸圆柱颗粒填充床的阻力特性,但是其 R^2 过小(C_1 和 C_2 的 R^2 分别为0.413和0.075),因此有必要提出新的圆柱颗粒填充床阻力预测模型。

(4)结合圆柱颗粒填充床的孔隙率提出新的拟合方法。采用此法拟合Ergun常数时, R^2 值大幅提高,且采用 d_{ep} 作为等效直径的 R^2 最高,远大于Nemec模型的 R^2 且拟合的实验数据涉及的 L/D 范围要比Nemec模型的更大,直径比Nemec更集中,因此适用范围容易确定,基于此提出的新模型实用性更强。

(5)在预测圆柱颗粒填充床的阻力时,以 d_{ep} 作为等效直径的Ergun常数分别为 $C_1=4546.3\varphi^{6.5462}\varepsilon^3/(1-\varepsilon)^2$, $C_2=(54.88 \ln \varphi + 30.072)\varepsilon^3/(1-\varepsilon)$,适用于圆柱直径3~4 mm, $L/D=1\sim 10$ 的圆柱颗粒填充床。

符 号 说 明

- A_p ——颗粒表面积, m^2
 C_1, C_2 ——Ergun常数
 D ——圆柱颗粒直径, m
 d_p ——颗粒直径, m
 d_{sd}, d_{vs}, d_{eq} ——等效直径, m
 K ——渗透率, m^2
 L ——圆柱颗粒长度, m
 m_b ——颗粒填充质量, kg
 ΔP ——单相流通过颗粒堆积床的阻力, Pa
 V_b ——颗粒填充体积, m^3
 V_p ——颗粒体积, m^3
 V_{pore} ——颗粒填充空隙体积, m^3
 v_s ——表观速度, m/s
 Z ——颗粒填充高度, m

ε ——颗粒填充床孔隙率

η ——通过性, m

μ ——流体动力黏度, Pa·s

ρ ——流体密度, kg/m^3

ρ_p ——颗粒密度, kg/m^3

φ ——球形度, $\varphi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}}(6V_p)^{\frac{2}{3}}}{A_p}$

参考文献

- [1] Lillo-Ródenas M A, Carratalá-Abril J, Cazorla-Amorós D, et al. Usefulness of chemically activated anthracite for the abatement of VOC at low concentrations [J]. Fuel Processing Technology, 2002, 77(2): 331-336.
- [2] Pierre M, Marie-Helene M, Jean-Noel F. Measurement and modeling of single- and multi-component adsorption equilibria of VOC on high-silica zeolites [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(11): 2410-2414.
- [3] Yun J H, Choi D K, Moon H. Benzene adsorption and hot purge regeneration in activated carbon beds [J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(23): 5857-5872.
- [4] Burghardt A, Bartelmus G, Gancarczyk A. Hydrodynamics of pulsing flow in three-phase chemical reactors [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 1999, 38(4/5/6): 411-426.
- [5] Lakota A, Levec J, Carbonell R G. Hydrodynamics of trickling flow in packed beds: relative permeability concept [J]. AIChE Journal, 2010, 48(4): 731-738.
- [6] MacDonald I F, Elsayed M S, Mow K, et al. Flow through porous media—the Ergun equation revisited [J]. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1979, 18(3): 199-208.
- [7] Rose A W. Porous media: fluid transport and pore structure (2nd Ed.) F. A. L. Dullien. Academic Press, San Diego, CA, 1992, 574 pp., US\$99.00 [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1993, 48(3): 372.
- [8] Ergun S. Fluid flow through packed columns [J]. Chem. Eng. Prog., 1952, 48(2): 89-94.
- [9] Niven R K. Physical insight into the Ergun and Wen & Yu equations for fluid flow in packed and fluidised beds [J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(3): 527-534.
- [10] Mayerhofer M, Govaerts J, Parmentier N, et al. Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles [J]. Powder Technology, 2011, 205(1/2/3): 30-35.
- [11] Nemec D, Levec J. Flow through packed bed reactors(I): Single-phase flow [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(24): 6947-6957.
- [12] Jami A M, Izadpanah M R. Pressure drop, gas hold-up and heat transfer during single and two-phase flow through porous media [J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2005, 26(1): 156-172.
- [13] Li L, Ma W. Experimental study on the effective particle diameter of a packed bed with non-spherical particles [J]. Transport in Porous Media, 2011, 89(1): 35-48.
- [14] Foumeny E A, Kulkarni A, Roshani S, et al. Elucidation of pressure drop in packed-bed systems [J]. Applied Thermal

- Engineering, 1996, **16**(3): 195–202.
- [15] Foumeny E A, Roshani S. Mean voidage of packed beds of cylindrical particles [J]. Chemical Engineering Science, 1991, **46**(9): 2363–2364.
- [16] Handley D, Heggs P J. Momentum and heat transfer mechanisms in regular shaped packings [J]. Trans. Instn. Chem. Engrs., 1968, **46**(9): T251–T264.
- [17] Foumeny E A, Benyahia F, Castro J A A, et al. Correlations of pressure drop in packed beds taking into account the effect of confining wall [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, **36**(2): 536–540.
- [18] Ozahi E, Gundogdu M Y, Carpinlioglu M Ö. A modification on Ergun's correlation for use in cylindrical packed beds with non-spherical particles [J]. Advanced Powder Technology, 2008, **19**(4): 369–381.
- [19] Leva M. Fluidization [M]. McGraw-Hill, 1959: 68–70.
- [20] Zou R P, Yu A B. Evaluation of the packing characteristics of mono-sized non-spherical particles [J]. Powder Technology, 1996, **88**(1): 71–79.
- [21] Clavier R, Chikhi N, Fichot F, et al. Experimental investigation on single-phase pressure losses in nuclear debris beds: identification of flow regimes and effective diameter [J]. Nuclear Engineering & Design, 2015, **292**(B4): 222–236.
- [22] Pahl M H. Über die Kennzeichnung diskret disperser Systeme und die systematische variation der Einflußgrößen zur Ermittlung eines allgemeingültigeren Widerstandsgesetzes der Porenströmung [D]. University of Karlsruhe, 1975.
- [23] Reichelt W. Zur Berechnung des Druckverlustes einphasig durchströmter Kugel - und Zylinderschüttungen [J]. Chemie Ingenieur Technik, 1972, **44**(18): 1068–1071.
- [24] England R, Gunn D. Dispersion, pressure drop, and chemical reaction in packed beds of cylindrical particles [J]. Trans. Instn. Chem. Engrs., 1970, **48**:T265–T275.
- [25] Yu B M, Li J H. A geometry model for tortuosity of flow path in porous media [J]. Chin. Phys. Lett., 2004, **21**(8): 1569–1571.
- [26] Wu J, Yu B, Yun M. A resistance model for flow through porous media [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2008, **71**(3): 331–343.
- [27] Park J H, Lee M, Moriyama K, et al. Influence of particle morphology on pressure gradients of single-phase air flow in the mono-size non-spherical particle beds [J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, **115**:1–8.
- [28] Chikhi N, Coindreau O, Li L X, et al. Evaluation of an effective diameter to study quenching and dry-out of complex debris bed [J]. Annals of Nuclear Energy, 2014, **74**:24–41.
- [29] Felice R D, Gibilaro L G. Wall effects for the pressure drop in fixed beds [J]. Chemical Engineering Science, 2004, **59**(14): 3037–3040.
- [30] Scott G D. Packing of spheres: packing of equal spheres [J]. Nature, 1960, **188**(4754): 908–909.
- [31] Yu A B, Zou R P, Standish N. Packing of ternary mixtures of nonspherical particles [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, **75**(10): 2765–2772.
- [32] Hwang K S, Choi D K, Gong S Y, et al. Adsorption and thermal regeneration of methylene chloride vapor on an activated carbon bed [J]. Chemical Engineering Science, 1997, **52**(7): 1111–1123.
- [33] Huang C C, Fair J R. Study of the adsorption and desorption of multiple adsorbates in a fixed bed [J]. AIChE Journal, 2010, **34**(11): 1861–1877.
- [34] Nastaj J, Ambrozek B. Analysis of gas dehydration in TSA system with multi-layered bed of solid adsorbents [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2015, **96**: 44–53.
- [35] Gabruš E, Nastaj J, Tabero P, et al. Experimental studies on 3A and 4A zeolite molecular sieves regeneration in TSA process: aliphatic alcohols dewatering–water desorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **259**(2): 232–242.
- [36] Moon D K, Park Y, Kim S H, et al. Analysis of thermal parameter effects on an adsorption bed for purification and bulk separation [J]. Separation & Purification Technology, 2017, **181**:95–106.