·药剂与工艺·

粒度级配设计改善发酵虫草菌粉粉体流动性与吸湿性研究

万倾兆[1]，张慧楠[1]，王生生[1]，彭旭龙[1]，彭常春[2]，许　云[2]，伍振峰[1]，王雅琪[1, 3*]

1. 江西中医药大学 经典名方现代中药创制全国重点实验室，江西 南昌　330004
2. 江西济民可信集团有限公司，江西 南昌　330224
3. 江西中医药大学 中药制药技术协同创新研究院，江西 南昌　330004

摘　要：目的　针对发酵虫草菌粉流动性差、易受潮的问题，引入粒度级配方法，探讨流动性参数与粒度分布之间的关系，为提升粉体性能、优化工艺处理策略提供依据。**方法**　采用激光粒度仪、粉体特性测试仪和粉体流变仪，对发酵虫草菌粉的粒度分布、静态流动性（休止角、豪森纳比、平板角等）和流变性质（流动能性质、充气性质、透气性质和剪切性质）进行系统表征，分析不同粒度配比对粉体填充行为和吸湿性能的影响。**结果**　粒径是影响发酵虫草菌粉流动性的关键因素，粒度级配为 24-80（95∶5）目的混合粉末填充性最优。吸湿动力学研究表明，双指数模型和威布尔模型均能较好地拟合不同粒径发酵虫草菌粉的吸湿行为，为其吸湿性提供量化指标。**结论**　粒度级配设计为提升发酵虫草菌粉的流动性和稳定性提供新思路。

关键词：发酵虫草菌粉；粉体；粒度级配；流动性；吸湿性

中图分类号：R283.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0253 - 2670(2026)07 - 2482 - 11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.07.005

Study on improving fluidity and hygroscopicity of fermented *Cordyceps* powder by particle size gradation design

WAN Qingzhao[1], ZHANG Huinan[1], WANG Shengsheng[1], PENG Xulong[1], PENG Changchun[2], XU Yun[2], WU Zhenfeng[1], WANG Yaqi[1, 3]

1. National Key Laboratory of Classical Formula for Modern Traditional Chinese Medicine Creation, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China
2. Jiangxi JeMinCare Group Co., Ltd., Nanchang 330224, China
3. Traditional Chinese Medicine Pharmaceutical Technology Collaborative Innovation Institute, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

Abstract: Objective　To address the issues of poor flowability and high hygroscopicity of fermented *Cordyceps* powder, the particle size gradation strategy and investigates the relationship between flowability parameters, particle size, and particle size distribution, so as to provide theoretical support and technical guidance for enhancing powder performance and optimizing processing strategies. **Methods**　A laser particle size analyzer, powder characteristics tester, and powder rheometer were employed to systematically characterize the particle size distribution, static flowability parameters (angle of repose, Hausner ratio, and flat plate angle, etc.), and rheological properties (flow energy, aeration, permeability, and shear behavior) of the fermented *Cordyceps* powder. The effects of different particle size ratios on powder packing behavior and hygroscopicity were analyzed. **Results**　Particle size is a critical factor affecting powder flowability. A particle size ratio of 24-80 (95:5) mesh yielded optimal packing performance. Hygroscopic kinetics modeling showed that both the double exponential and Weibull models provided good fits for describing the moisture absorption behavior of powders with different particle sizes, offering quantitative indicators of hygroscopicity. **Conclusion**　Particle size

收稿日期：2025-10-15

基金项目：国家重点研发计划项目资助（2023YFC3504504）

作者简介：万倾兆，硕士研究生，研究方向为中药质量分析与控制。Tel: (0791)87118108　E-mail: wqz302005@163.com

***通信作者：**王雅琪，博士，副教授，研究方向为中药质量分析与控制。Tel: (0791)87118108　E-mail: wangyaqi_3@163.com

gradation design provides a new strategy for improving the flowability and stability of fermented *Cordyceps* powder.

Key words: fermented *Cordyceps* powder; powder; particle size gradation; fluidity; hygroscopicity

制药过程中，粉体的流动性是影响压片、胶囊填充等工艺环节的关键参数[1]。目前，粉体流动性的评价方法主要集中在静态表征，如休止角、堆积密度等，反映粉体的自然堆积行为。但是粉体在流动过程的量化表征研究相对较少，因此，本研究采用旋转剪切仪、粉体流变仪等设备，量化粉体在实际流动过程中的摩擦力和内聚力，揭示粉体在加工过程中的流动特性[2-4]。粉体流变仪采用垂直旋转桨叶结构，结合可控机械力作用，可测量基本流动能（basic flowability energy，BFE）、比流动能（specific energy，SE）、剪切指数（stability index，SI）、流速指数（flow rate index，FRI）、预处理松装密度（casson bulk density，CBD）等多项参数，并进一步评估粉体的透气性、压缩性等性能指标[5]。近年来，随着粉体工程的发展，流动函数和压缩性指数等综合评估方法被广泛应用于量化粉体的加工行为，特别是在输送、混合等环节中具有更高的预测精度[6]。

借鉴工程地质学中的“颗粒级配”理论[7]，引入粒度级配方法，优化菌粉的流动性。颗粒级配是指通过科学配置不同粒径颗粒的比例，实现颗粒间协同堆积的最优化。该理论中，大颗粒形成骨架结构，小颗粒有效填充大颗粒间隙，以此实现堆积密度最大化，孔隙率最小化，改善粉体性能。本研究通过测量并比较不同粒径发酵虫草菌粉的流动参数，明确不同粒径对其流动性能的影响。结合粒度级配方法（图 1），优化不同粒径发酵虫草菌粉的混合比例，探讨其对粉体堆积密度与流动性的改善作用。为改善细颗粒团聚导致的流动性与填充性能下降，理清粒径与粒度级配对发酵虫草菌粉流动性及填充性能的作用规律提供参考。

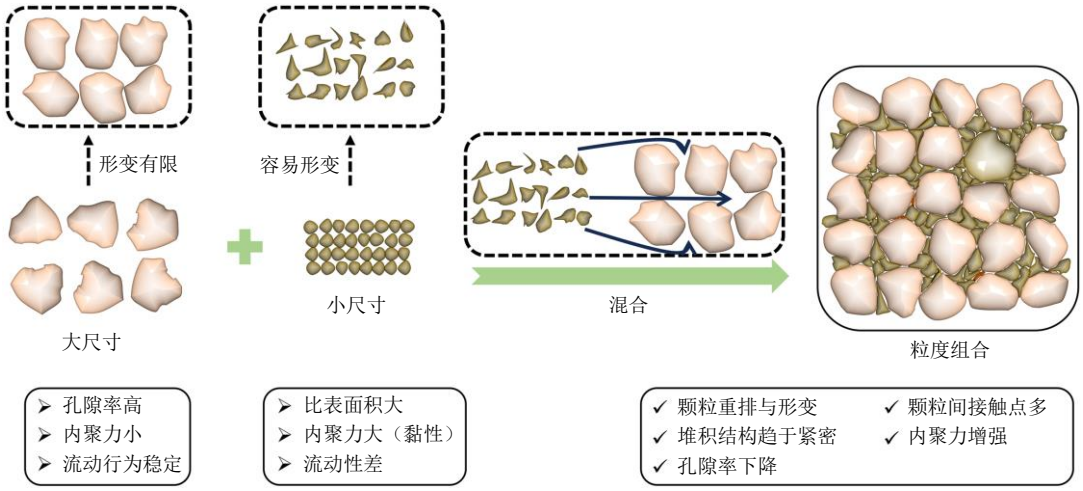


图 1　粒度级配示意图

Fig. 1　Schematic diagram of particle size distribution

1　仪器与材料

1.1　仪器

FT-2000A 型粉体特性测试仪、BZS-200 型标准振动筛分机，宁波瑞科微智能科技有限公司；FT4 型流变仪，英国富瑞曼科技有限公司；Mastersizer 2000 型马尔文帕纳科激光粒度仪，英国马尔文仪器有限公司；BSA224S-CW 型万分之一电子天平，德国赛多利斯集团；HD-1386C 型除湿机，广州多乐信电器有限公司；VH-5V 型混合器，吉首市中诚制药机械厂；60ST-M01330 型旋转填充仪，团队自行组装搭建；DE-200 型多功能高速粉碎机，浙江红景天工贸有限公司；标准药典筛，1～9 号，长沙市雨花区思科仪器纱筛厂。

1.2　材料

发酵虫草菌粉由江西济民可信集团有限公司提供，批号分别为 22100533、22100537。

2　方法与结果

2.1　不同粉碎粒径对发酵虫草菌粉粉体特性的影响

2.1.1　不同粒径发酵虫草菌粉的制备　将菌粉置于多功能粉碎机中粉碎，依次分级过筛得 10、24、50、80、100、150、200 目 7 组不同粒径粉末。

2.1.2　静态粉体特性表征　采用 FT2000 型粉体特

性测试仪对粉体的静态流动性能进行评估，休止角采用注入法测定，崩溃角采用倾斜板法测定，每项指标重复测定 3 次，计算平均值，以确保数据的可靠性与重复性，同时测定松散密度、振实密度、孔隙率及粒径参数等指标（表 1）。结果表明，随着粉碎程度的提高，粉体粒径减小，振实密度和松散密度逐渐下降，而休止角与崩溃角显著上升，表明粉体流动性能随粒径减小而降低。其主要原因在于颗粒细化后比表面积显著增大，范德华力和静电力等粒间作用增强，颗粒间内聚性上升，导致颗粒间滑动与滚动受阻[8]。与此同时，小颗粒易填充于大颗粒间隙中，破坏了理想堆积结构的松弛性与可重排性，增加了流动阻力，从而使振实密度、松散密度下降[9]；此外，粒径减小还提高了粉体表面能，使颗粒在接触界面形成更强的黏附作用，整体流变阻力增大，表现为流动性下降[10]。

表 1　不同粒径发酵虫草菌粉粉体特性测试结果（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 1　Results of powder characterisation of fermented *Cordyceps* powder with different particle sizes ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

粉末	休止角/(°)	振实密度/(g·mL^{-1})	松散密度/(g·mL^{-1})	崩溃角/(°)	平板角/(°)	差角/(°)	卡尔指数/%	豪森纳比
10 目	35.44±0.08	0.60±0.00	0.50±0.00	32.29±0.41	35.43±0.31	3.14±0.33	0.15±0.00	1.18±0.00
24 目	35.67±0.28	0.63±0.02	0.55±0.00	31.95±0.74	33.78±0.75	3.72±0.47	0.14±0.01	1.16±0.01
50 目	35.00±0.11	0.64±0.00	0.55±0.00	31.70±0.16	33.82±0.19	3.30±0.05	0.15±0.01	1.17±0.02
80 目	43.17±0.06	0.53±0.01	0.43±0.00	39.45±0.81	43.42±0.16	3.43±0.23	0.18±0.01	1.22±0.02
100 目	42.51±0.06	0.55±0.00	0.45±0.00	38.77±0.42	44.17±0.03	3.74±0.36	0.19±0.01	1.23±0.01
150 目	43.37±0.54	0.51±0.01	0.41±0.00	41.77±0.99	43.48±0.26	1.60±0.45	0.19±0.00	1.23±0.00
200 目	43.23±0.06	0.44±0.01	0.35±0.00	40.20±0.25	44.67±0.23	3.04±0.19	0.22±0.00	1.28±0.01

2.1.3　动态流变特性表征　采用 FT4 型粉末流变仪，对不同粒径发酵虫草菌粉动态流变特性进行表征，表征结果见表 2 和图 2。粉体动态流动性能可通过多个参数（如 BFE、SE、SI）进行评估，通常 SI 值越接近 1，说明粉末流动行为越稳定；SE 值越大，表明粉体内聚性越强，流动性越差；而 FRI 值越小，说明流动速率对粉体流动性的影响越小[11]。由表 2 可以发现，24～100 目粒径的 SI 值接近 1，表明其流动行为较其他粒径稳定；FRI 值和 SE 值 50 目以下粒径与其他粒径有较大差异，说明其流动性更好并且流动速率对粉体流动性的影响较小。

使用多个参数（透气性、充气性、可压性、固结测试、剪切性能和壁面摩擦）对不同粒径虫草菌粉动态流变特性进行表征。透气性和充气性测试结果见图 2-a、b。透气性反映粉体在不同压缩状态下的透气阻力，200 目粉体随着压力的增加，阻力显著变化，说明受压状态下细小颗粒极易发生重排和塑性变形，使粉体床变得致密，空气通道被大量堵塞，导致架桥，造成下料不均，填充或压片质量差异大。10～50 目粉体透气性较好。其结果与固结测试结果（图 2-d）一致，80～200 目粉体不仅静置时会固结，主动压缩时，更易形成低透气性的致密结构。充气性反映在充气状态下发生流动所需要消耗的能量。80～200 目粉体总能量随着空气速度的增加而急剧下降，说明气流足够的情况下，其流动性得到显著改善，适合气力输送系统。对于 10～50 目粉体，曲线相对平坦，说明这种粉体的流动性对周围气流不敏感，主要受重力颗粒间的机械摩擦决定，工艺稳健性高，适合如胶囊填充、压片下料等传统重力驱动型工艺。

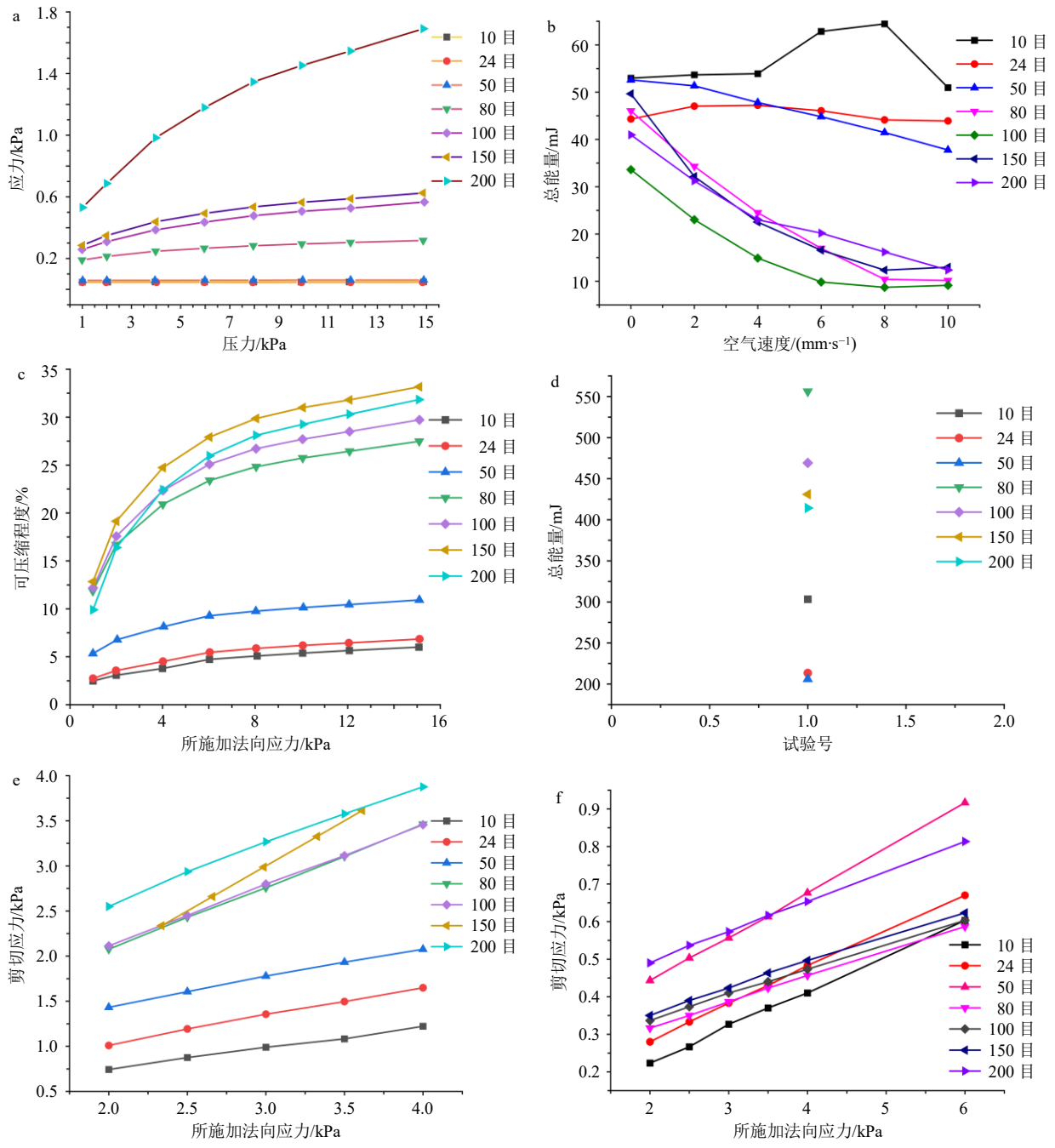
表 2　不同粒径发酵虫草菌粉流动能测试结果（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 2　Test results of flow energy of fermented *Cordyceps* powder with different particle sizes ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

粉末	SI	FRI	SE/(mJ·g^{-1})
10 目	0.87±0.09	1.16±0.21	3.33±0.36
24 目	0.96±0.03	1.09±0.06	2.62±0.08
50 目	1.05±0.01	1.09±0.01	3.71±0.11
80 目	1.06±0.01	1.46±0.06	5.71±0.12
100 目	1.04±0.11	1.81±0.08	5.68±0.12
150 目	1.12±0.11	1.70±0.02	6.84±0.37
200 目	1.15±0.06	2.41±0.04	7.62±0.07

可压性测试结果（图 2-c）与前期结果一致，80～200 目粉体曲线陡峭，可压缩程度随应力显著变化。说明细小颗粒具有巨大的比表面积和更多的接触点，展示了较佳的可压性，适合压片。10～50 目粉体可压缩程度变化小，说明主要发生弹性变形和有限的重排，可压性较差，适合输送、填充。

剪切性能可以量化粉体在料斗中流动，颗粒内部的摩擦阻力。结果（图 2-e）与图 2-a、b 一致，80～200 目粉体内聚力较大，摩擦角大，说明随着



a-透气性；b-充气性；c-可压性测试；d-固结测试；e-剪切性能；f-壁面摩擦；图 5 同。

a-permeability; b-inflatability; c-compressibility test; d-consolidation test; e-shear performance; f-wall friction; Same as figure 5.

图 2　不同粒径发酵虫草菌粉流变性测试结果（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Fig. 2　Rheological test results of fermented *Cordyceps* powder with different particle sizes ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

压力增加，粉体内部抗流动的剪切应力升高显著，粉体表现得较为顽固。10～50 目粉体初始剪切应力小，斜率小，说明内聚力弱，内摩擦角小，粉体松散易于流动。

壁面摩擦结果（图 2-f）表明，粉体与壁面的摩擦阻力，50 目粉体与 200 目粉体曲线接近，且斜率反而更高，说明 50 目粉体表面相对粗糙，200 目细粉内聚力强，颗粒接近球形，减少了滑动摩擦。

动态流变性参数（透气性、充气性、可压性、固结测试、剪切性能和壁面摩擦）示意图见图 3。

2.2　引入颗粒级配方法，改善菌粉流动性能

通过优化不同粒径发酵虫草菌粉的混合比例，探讨其对粉体堆积密度与流动性的改善作用。

2.2.1　粒度级配发酵虫草菌粉的制备　根据前期动

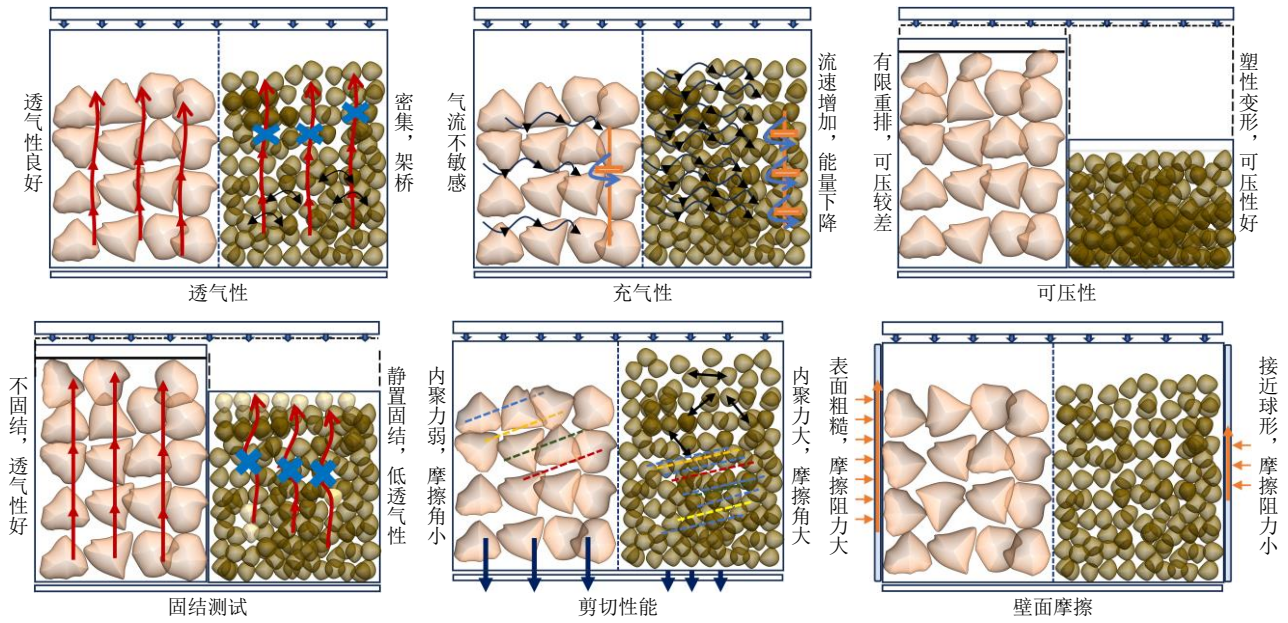


图 3　动态流变性参数（透气性、充气性、可压性、固结测试、剪切性能和壁面摩擦）示意图

Fig. 3　Dynamic rheological parameters (permeability, inflatability, compressibility, consolidation test, shear performance, and wall friction) schematic diagram

态流变的特征，得知 10～50 目粉体流动性较好，80～200 目菌粉内聚力更强。因此，粒度级配采用 24 目和 80 目粉体，将二者按质量 24-80（85∶15）、24-80（90∶10）、24-80（95∶5）目用 VH-5V 型混合器混合 30 min，使其不同粒径粉末混合均匀。

2.2.2　粒径测试　采用马尔文激光粒度测定仪，利用激光散射原理，通过测量粉体颗粒散射的激光光线的角度，对 24、80 目及二者 85∶15、90∶10、95∶5 质量比粒度级配混合的发酵虫草菌粉粉末进行粒度分布测定，记录 D_{10}、D_{50}、D_{90}（分别表示粉体样品中粒径小于该值的颗粒占总量的 10%、50%、90%，依次反映细颗粒、中位粒径和粗颗粒分布特征）、分布跨度值 span、比表面积及体积平均粒径值，结果如表 3 所示，不同比例级配后的虫草菌粉兼具粗粉的骨架稳定性与细粉的填隙优势，粒度分布更均衡，从而呈现更有利的粉体特性基础。

2.2.3　粒度级配对发酵虫草菌粉填充特性的影响　采用自制胶囊填充装置，该装置由旋转圆盘和粉体供料系统组成[12]。圆盘旋转时，空胶囊被引导至填充区域，粉体由供料系统注入，单位时间内的填充量可作为粉末流动性的重要指标。结果如图 4 所示，24 目和 24-80（95∶5）目级配条件下表现出最佳的填充性能，在不同速度条件下均具有较高的填充密度和良好的流动性。结果表明适量的大颗粒比例及优化的粒度级配，有助于提高粉体的堆积结构与填充效率。

2.2.4　粒度级配对发酵虫草菌粉静态粉体特性的影响　由表 4 可以发现，80 目组在各项静态粉体特性测试指标（休止角、孔隙率、中值粒径等），与其他组存在较明显差异。粒度级配［24-80（85∶15）目、24-80（90∶10）目、24-80（95∶5）目］组与 24 目组的各项粉体特性参数差异相对较小，但仍可以观察到粒度级配组在松散密度和振实密度上略高于 24 目组。说明通过引入一定比例的细颗粒填补粗颗

表 3　不同级配发酵虫草菌粉粉体的粒径大小（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 3　Particle size distribution of fermented *Cordyceps* powder with different gradations ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

组别	D_{10}/μm	D_{50}/μm	D_{90}/μm	span	比表面积/($m^2 \cdot g^{-1}$)	体积平均粒径/μm
24 目	443.23±2.94	701.59±0.77	1 127.92±7.89	0.98±0.02	0.01±0.00	749.79±1.17
80 目	46.52±0.42	113.56±0.03	212.30±0.22	1.46±0.01	0.07±0.00	122.56±0.01
24-80 (85∶15)目	342.19±36.42	683.38±44.84	1 282.09±66.97	1.38±0.04	0.01±0.00	752.65±47.60
24-80 (90∶10)目	398.94±7.72	693.48±10.48	1 209.10±76.58	1.17±0.10	0.01±0.01	754.73±23.61
24-80 (95∶5)目	408.62±16.59	692.89±9.85	1 189.07±31.41	1.12±0.09	0.01±0.00	752.43±0.16

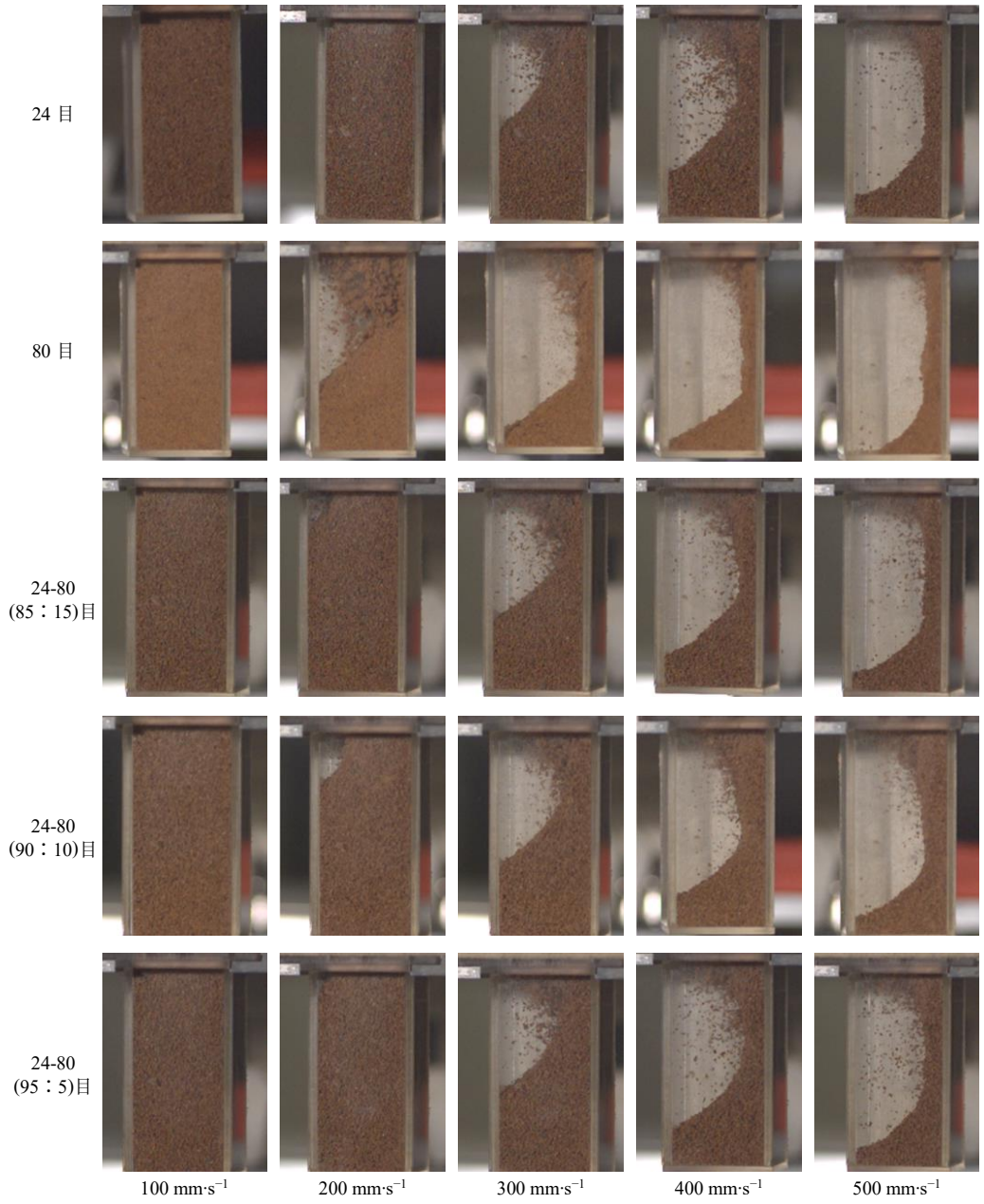


图 4　立即测试发酵虫草菌粉填充行为图

Fig. 4　Immediately test filling behavior of fermented *Cordyceps* powder

表 4　不同粒径比发酵虫草菌粉粉体特性指标（$\bar{x} \pm s$, $n = 3$）

Table 4　Characteristics of fermented *Cordyceps* powder with different particle size ratios ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

组别	休止角/(°)	豪森纳比	卡尔指数/%	孔隙率	松散密度/(g·mL^{-1})	振实密度/(g·mL^{-1})	崩溃角/(°)	差角/(°)	D_{50}
24 目	38.21±0.35	1.25±0.01	0.20±0.01	0.36±0.01	0.56±0.00	0.70±0.01	33.10±0.33	5.11±0.03	701.59±0.77
80 目	41.78±0.03	1.29±0.00	0.23±0.00	0.42±0.00	0.54±0.00	0.70±0.00	37.24±0.08	4.54±0.05	113.56±0.03
24-80 (85∶15)目	40.68±0.26	1.25±0.01	0.20±0.00	0.36±0.01	0.57±0.00	0.71±0.00	34.79±0.37	5.89±0.64	683.38±44.84
24-80 (90∶10)目	40.02±0.30	1.27±0.00	0.22±0.00	0.38±0.00	0.57±0.00	0.72±0.00	34.33±0.00	5.70±0.30	693.48±10.48
24-80 (95∶5)目	39.20±0.18	1.27±0.01	0.21±0.01	0.39±0.01	0.55±0.00	0.69±0.00	34.26±0.23	4.94±0.06	692.89±9.85

粒间的空隙，实现堆积更为紧密，提高堆积密度。

2.2.5　粒度级配对发酵虫草菌粉动态流变性的影响　表 5 结果显示，SE 方面，24-80（95∶5）目级配组内聚性较强，而在 BFE 值方面，24-80（85∶15）、

24-80（90∶10）和 24-80（95∶5）目级配组均呈现随级配比例调整而增加的趋势，24-80（95∶5）目组 BFE 值最高。尽管 SI 和 FRI 值接近，24-80（95∶5）目级配组在整体流动过程中流动行为较其他粒径稳定，流动性更好，且内聚性相对较强，反映出更复杂的颗粒间作用特征。透气性和充气性测试结果见图 5-a、b，级配后粉体透气性得到改善。24-80（95∶5）目级配组曲线相对平坦，工艺稳健性高；可压性测试结果（图 5-c）显示，24-80（95∶5）目级配组粉体可压缩程度变化小，主要发生弹性变形

表 5　不同粒径比发酵虫草菌粉流动能测试结果（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 5　Flow energy test results of fermented *Cordyceps* powder with different particle size ratios ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

组别	BFE/mJ	SI	FRI	SE/(mJ·g^{-1})	组别	BFE/mJ	SI	FRI	SE/(mJ·g^{-1})
24-80 (85∶15)目	94.59±2.68	0.99±0.00	1.00±0.04	2.59±0.08	24 目	88.81±1.34	0.96±0.03	1.09±0.04	2.62±0.08
24-80 (90∶10)目	92.89±0.16	0.98±0.00	1.13±0.02	2.46±0.01	80 目	81.49±3.15	1.06±0.01	1.46±0.04	5.71±0.02
24-80 (95∶5)目	113.88±4.90	1.00±0.04	0.99±0.01	2.92±0.11					

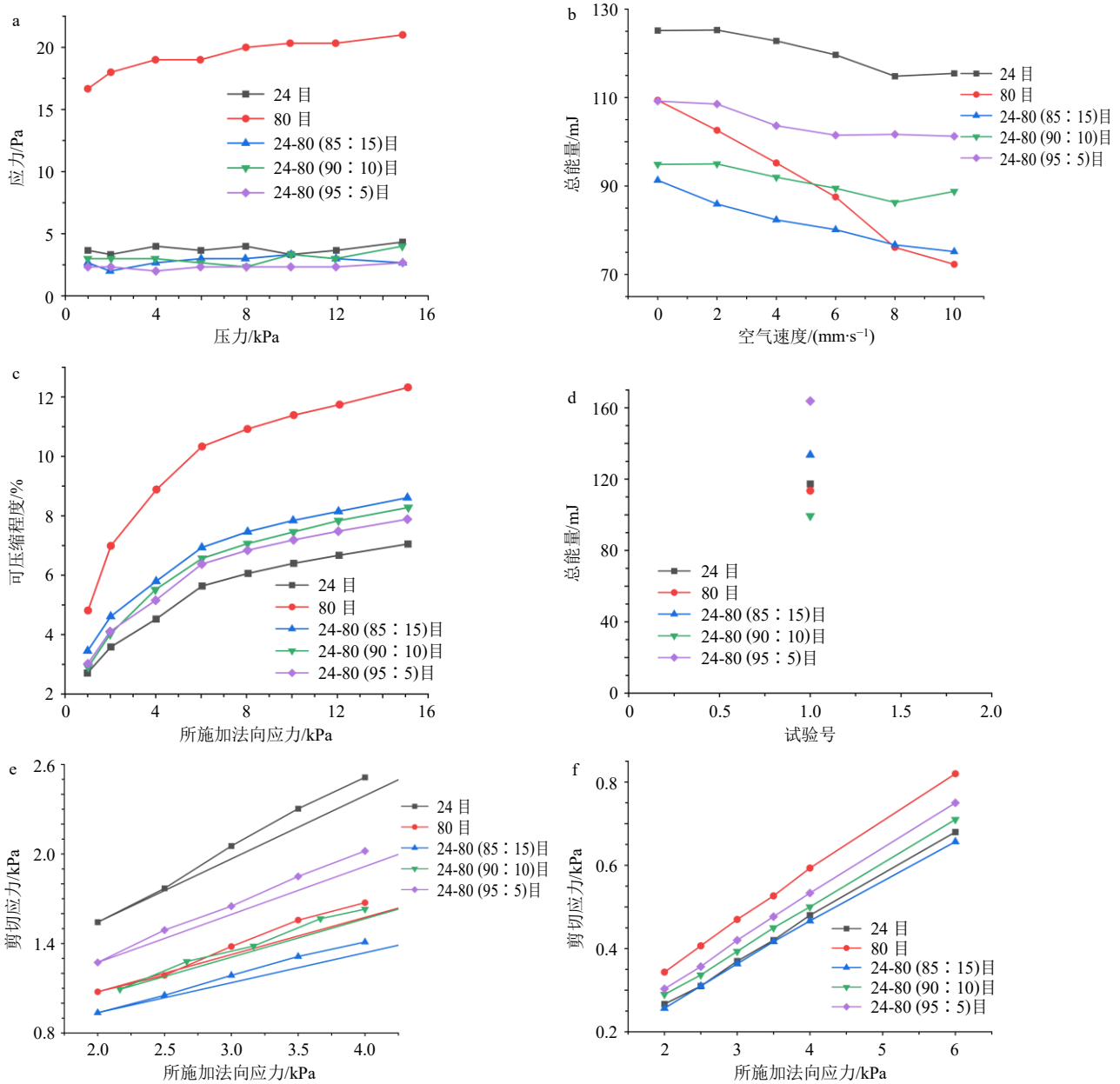


图 5　不同粒度级配发酵虫草菌粉流变性测试结果（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Fig. 5　Rheological test results of fermented *Cordyceps* powder with different particle size grading ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

和有限的重排；剪切性能结果（图 5-e）显示，24-80（95∶5）目级配组粉体内聚力相对较大，粉体稳定性较好；壁面摩擦结果（图 5-f）表明，不同组别曲线接近，滑动摩擦类似。

2.3 粒度对发酵虫草菌粉吸湿性的影响

为探究不同粒度对粉体的吸湿性的影响，绘制吸湿曲线对吸湿行为进行表征，数学模型拟合，揭示吸湿动力学特征。

2.3.1 不同粒径对菌粉吸湿性的模型拟合 对不经吸湿处理的发酵虫草菌粉，作为立即测试样品进行吸湿曲线绘制，即取“2.1.1”项下所得不同目数的发酵虫草菌粉样品各约 1 g，置于预先干燥至恒定质量的称量瓶中，精密称定。样品于 80 ℃真空干燥至恒定质量，即连续 2 次称量间隔 1 h，质量差不超过 1 mg 时视为达到恒定质量。干燥后样品转移至干燥器中放置 12 h，以去除残余水分。随后将样品置于含饱和氯化钠溶液的干燥器中，分别在 0、2、4、6、8、10、12、24、36、48、60、72、96、120 h 取出并称定质量。根据不同时间点下的质量变化，计算吸湿率[13]。

吸湿率＝(吸湿后粉体质量－吸湿前粉体质量)/吸湿前粉体质量

在相对湿度 75%的高湿环境下，粉体的吸湿速度加快，饱和时间延长，易出现形变和粘连。采用零级、一级、一元二次方程、双指数和威布尔模型，对 7 种粒径的粉末的吸湿曲线进行拟合，相关系数 R^2 评估模型的优劣[14]。结果如图 6 所示，在 75%相对湿度下，原粉吸湿性最强，整体趋势相同。10 目组粉体，48 h 后吸湿显著上升，趋势不稳定。由表 6 可知，双指数和威布尔模型对粉末均有较好的拟合度，可较好的描述菌粉的吸湿行为。

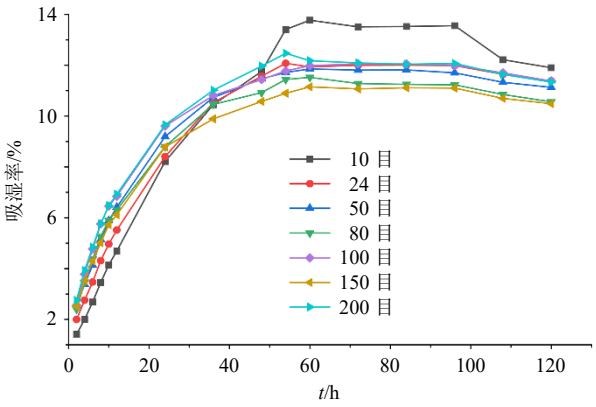


图 6 不同粒径发酵虫草菌粉吸湿曲线

Fig. 6 Moisture absorption curve of fermented *Cordyceps* powder with different particle sizes

表 6 不同粒径发酵虫草菌粉拟合方程与相关系数（R^2）

Table 6 Fitting equations and correlation coefficients (R^2) for fermented *Cordyceps* powder of different particle sizes

粉末	零级过程	一级过程	一元二次方程	双指数模型	威布尔模型
10 目	$y=4.03+0.10x$，$R^2=0.715\,48$	$y=13.56\,(1-e^{-0.04x})$，$R^2=0.974\,42$	$y=-0.002x^2+0.33x+0.99$，$R^2=0.991\,75$	$y=-6.66\,e^{-x/22.42}-7.29\,e^{-x/22.42}+13.46$，$R^2=0.975\,61$	$y=13.13-11.70\,e^{-(0.04x)^{1.52}}$，$R^2=0.985\,30$
24 目	$y=4.68+0.08x$，$R^2=0.708\,78$	$y=12.06\,(1-e^{-0.06x})$，$R^2=0.990\,33$	$y=-0.002x^2+0.26x+2.25$，$R^2=0.976\,11$	$y=-5.50\,e^{-x/19.32}-6.16\,e^{-x/19.32}+12.12$，$R^2=0.991\,55$	$y=11.92-10.16\,e^{-(0.05x)^{1.35}}$，$R^2=0.996\,19$
50 目	$y=5.43+0.07x$，$R^2=0.671\,17$	$y=11.66\,(1-e^{-0.07x})$，$R^2=0.987\,88$	$y=-0.002x^2+0.24x+3.17$，$R^2=0.961\,13$	$y=-5.27\,e^{-x/16.36}-5.46\,e^{-x/16.36}+11.77$，$R^2=0.993\,73$	$y=11.66-9.67\,e^{-(0.06x)^{1.24}}$，$R^2=0.996\,16$
80 目	$y=5.42+0.07x$，$R^2=0.653\,66$	$y=11.15\,(1-e^{-0.08x})$，$R^2=0.984\,79$	$y=-0.001x^2+0.23x+3.26$，$R^2=0.956\,57$	$y=-5.10\,e^{-x/15.53}-5.05\,e^{-x/15.53}+11.26$，$R^2=0.991\,65$	$y=11.19-9.40\,e^{-(0.06x)^{1.16}}$，$R^2=0.992\,81$
100 目	$y=5.79+0.07x$，$R^2=0.677\,15$	$y=11.79\,(1-e^{-0.08x})$，$R^2=0.988\,15$	$y=-0.001x^2+0.23x+3.65$，$R^2=0.952\,87$	$y=-5.50\,e^{-x/15.41}-5.09\,e^{-x/15.41}+11.93$，$R^2=0.996\,41$	$y=11.91-10.47\,e^{-(0.06x)^{1.02}}$，$R^2=0.996\,43$
150 目	$y=5.26+0.07x$，$R^2=0.683\,74$	$y=10.89\,(1-e^{-0.08x})$，$R^2=0.984\,16$	$y=-0.001x^2+0.21x+3.26$，$R^2=0.962\,20$	$y=-4.82\,e^{-x/16.54}-4.87\,e^{-x/16.54}+11.04$，$R^2=0.995\,22$	$y=10.97-9.08\,e^{-(0.06x)^{1.14}}$，$R^2=0.996\,04$
200 目	$y=5.97+0.07x$，$R^2=0.648\,31$	$y=11.95\,(1-e^{-0.08x})$，$R^2=0.981\,91$	$y=-0.002x^2+0.24x+3.69$，$R^2=0.954\,44$	$y=-5.40\,e^{-x/15.29}-5.30\,e^{-x/15.29}+12.08$，$R^2=0.991\,13$	$y=12.01-10.00\,e^{-(0.06x)^{1.16}}$，$R^2=0.992\,32$

2.3.2 粒度级配吸湿粉末的制备 以“2.1.1”项下 24、80 目及“2.2.1”项下质量比 85∶15、90∶10、95∶5 菌粉平均分为 3 份：立即测试粉末，一次吸湿粉末和二次吸湿粉末。将此粉末平铺在盘子中，放进药品稳定性试验箱（温度 25 ℃，相对湿度 75%），每隔 0.5 h 进行翻拌，使其吸湿均匀，且防止粉末过湿结块团聚。一次吸湿是在 6 h 取出，二次吸湿为 12 h 后取出，密封。

2.3.3 吸湿对粒度级配菌粉特性指标的影响 由表 7 可知，吸湿时间延长显著降低粉体流动性，颗粒

表 7　不同吸湿情况发酵虫草菌粉粉体特性指标结果（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 7　Results of powder characteristic parameters of fermented *Cordyceps* powder under different hygroscopic conditions ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

组别	休止角/(°)			豪森纳比			孔隙率/%			卡尔指数/%		
	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿
24 目	38.21±0.35	36.87±0.06	38.72±0.50	1.25±0.01	1.20±0.01	1.21±0.00	0.36±0.01	0.30±0.01	0.32±0.01	0.20±0.01	0.17±0.01	0.17±0.00
80 目	41.78±0.03	39.90±0.33	41.91±0.57	1.29±0.00	1.24±0.00	1.28±0.01	0.42±0.00	0.35±0.00	0.41±0.01	0.23±0.00	0.19±0.00	0.22±0.00
24-80 (85∶15)目	40.68±0.26	41.76±0.20	42.86±0.28	1.25±0.01	1.23±0.01	1.25±0.00	0.36±0.01	0.33±0.01	0.36±0.00	0.20±0.00	0.19±0.01	0.20±0.00
24-80 (90∶10)目	40.02±0.30	41.58±0.00	42.53±0.03	1.27±0.00	1.23±0.00	1.22±0.00	0.38±0.01	0.33±0.01	0.33±0.01	0.22±0.00	0.19±0.00	0.18±0.00
24-80 (95∶5)目	39.20±0.18	39.09±0.11	40.86±0.38	1.27±0.01	1.21±0.01	1.24±0.00	0.39±0.01	0.31±0.01	0.37±0.01	0.21±0.01	0.17±0.00	0.19±0.00

组别	振实密度/(g·mL^{-1})			松散密度/(g·mL^{-1})			崩溃角/(°)			差角/(°)		
	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿
24 目	0.70±0.00	0.69±0.01	0.64±0.00	0.56±0.00	0.57±0.00	0.53±0.00	33.10±0.33	31.79±0.40	35.07±0.38	5.11±0.03	5.08±0.47	3.65±0.88
80 目	0.70±0.00	0.68±0.00	0.68±0.00	0.54±0.00	0.55±0.00	0.53±0.00	37.24±0.08	33.00±0.07	40.86±0.37	4.54±0.05	6.90±0.40	1.05±0.20
24-80 (85∶15)目	0.71±0.01	0.68±0.01	0.69±0.00	0.57±0.00	0.56±0.00	0.56±0.00	34.79±0.37	32.76±0.07	33.51±0.64	5.89±0.64	5.99±0.13	5.35±0.37
24-80 (90∶10)目	0.72±0.00	0.69±0.00	0.68±0.00	0.57±0.00	0.56±0.00	0.56±0.00	34.33±0.00	32.10±0.08	34.35±0.15	5.70±0.30	6.48±0.08	4.17±0.12
24-80 (95∶5)目	0.69±0.00	0.69±0.00	0.65±0.00	0.55±0.00	0.57±0.00	0.52±0.00	34.26±0.23	32.13±0.00	36.51±0.14	4.94±0.06	5.96±0.11	2.35±0.24

组别	平板角/(°)			含水量/%		
	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿
24 目	33.95±0.15	31.52±0.42	35.75±0.07	0.78±0.01	7.53±0.06	18.42±0.03
80 目	39.39±0.19	34.64±0.14	40.21±0.01	2.92±0.01	8.85±0.09	16.80±0.06
24-80 (85∶15)目	37.89±0.01	33.88±0.30	36.14±0.37	1.17±0.01	8.08±0.13	14.84±0.00
24-80 (90∶10)目	36.25±0.37	33.05±0.11	36.34±0.03	1.13±0.02	6.93±0.13	15.08±0.11
24-80 (95∶5)目	36.62±0.40	32.51±0.05	35.35±0.20	0.97±0.02	7.39±0.01	16.53±0.08

间内聚力增强。在吸湿作用下，发酵虫草菌粉的粉体性质发生显著变化。随着吸湿时间延长，粉体表面逐渐形成薄层水膜，颗粒间的液桥力与静电吸附增强，使体系内聚力上升、流动性下降[15]。相较于立即测试样品，一次或二次吸湿样品豪森纳比、卡尔指数、孔隙率、振实密度和松散密度等呈下降趋势，而休止角、含水量呈上升趋势，说明粉体的可流动性减弱、可压缩性增强。值得注意的是，级配组（如 95∶5、90∶10）在吸湿后参数变化幅度明显小于单一粒度组（24、80 目），表明合理的粒径组合可显著改善吸湿后粉体的稳定性。这主要归因于级配体系中细颗粒的适度填隙作用，有助于减缓吸湿引起的结构塌陷与团聚，维持较好的颗粒重排与受力传递；而单一粒度粉末在吸湿后因比表面积增大、颗粒接触界面黏附强化，易发生团聚与堆积致密化，导致流动阻滞[16]。总体而言，吸湿过程加剧了粉体的内聚性和堆积不均，但合理级配能在一定程度上缓冲湿度对流动与填充行为的不利影响，从而提高发酵虫草菌粉在潮湿环境下的加工适应性与流动稳定性。

2.3.4　吸湿对粒度级配菌粉流变性分析　由表 8 可知，吸湿对不同比例发酵虫草菌粉的粉体流变性影

表 8　不同吸湿情况发酵虫草菌粉粉体流变性分析（$\bar{x} \pm s$，$n = 3$）

Table 8　Analysis of powder rheological properties of fermented *Cordyceps* powder under different hygroscopic conditions ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

组别	BFE/mJ			SI			FRI			SE/(mJ·g^{-1})		
	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿	立即测试	一次吸湿	二次吸湿
24 目	88.81±1.34	103.40±0.54	393.72±4.89	0.96±0.03	0.87±0.01	1.12±0.00	1.09±0.04	1.04±0.02	0.49±0.00	2.62±0.08	2.36±0.03	4.84±0.01
80 目	81.49±3.15	90.91±1.22	243.80±4.64	1.06±0.01	0.86±0.01	1.06±0.04	1.46±0.04	0.96±0.01	0.71±0.01	5.71±0.02	8.21±0.03	6.00±0.07
24-80 (85∶15)目	94.59±2.68	103.83±2.97	242.20±18.00	0.99±0.00	0.82±0.01	1.04±0.06	1.00±0.04	0.99±0.02	0.66±0.04	2.59±0.08	2.59±0.21	4.39±0.09
24-80 (90∶10)目	92.89±0.16	98.60±2.04	247.67±8.90	0.98±0.00	0.68±0.04	1.07±0.02	1.13±0.02	0.98±0.01	0.62±0.02	2.46±0.01	2.45±0.07	4.24±0.06
24-80 (95∶5)目	113.88±4.90	103.79±0.33	517.91±3.12	1.00±0.04	0.82±0.05	1.14±0.02	0.99±0.01	0.99±0.02	0.49±0.04	2.92±0.11	2.57±0.00	6.02±0.29

响显著，尤其对流动性指标 BFE 变化最为敏感。随着吸湿时间延长，BFE 值逐步升高，表明粉体在流动过程中需克服更大的内聚阻力；其原因可能在于吸湿后颗粒表面形成水膜和液桥，增强了颗粒间的黏附与内聚作用，使粉体由干态的摩擦流动转变为黏结主导的湿态流动，导致能量消耗增加[17-18]。

3 讨论

本研究表明，粒径对发酵虫草菌粉的流动性具有决定性影响：粗粒组（如 10、24 目）因颗粒形貌不规则、粒径分布宽，滚动受阻，导致流动性与堆积稳定性不佳；细粒组（≥80 目）则因比表面积显著增大，范德华力、静电力及吸湿后液桥力相对增强，颗粒间内聚性上升、团聚倾向加剧，表现为休止角、崩塌角及能量型指标（如 BFE）增大、振实/松散密度降低。因此，粒径缩小而并非单调改善流动性，而是存在“形貌-比表面积-内聚力”之间的权衡[19]，当细化效应带来的黏附/内聚增强超过粒度均一化带来的流动性好时，流动性转而下降[20]。

合理的粒度级配可有效改善粉体堆积结构，少量细粒填充粗粒间隙，提升致密度并降低局部空隙波动，提升胶囊填充性能。因此，与单一粒度相比，级配组在休止角、崩塌角、豪森纳比/卡尔指数以及 BFE 等指标上均呈现更优或更稳健的表现，且对外界扰动（如湿度升高、充填剪切）具有更强的“缓冲”能力。尤其是 95∶5 级配组在堆积密度和填充均匀性方面表现突出，混合比例组（90∶10、85∶15、95∶5）综合性能优于单一粒度组。

吸湿行为会显著影响粉体流动性，吸湿使颗粒表面形成薄层水膜与液桥，内聚力增强，细颗粒粉体更易团聚，导致流动性下降，宏观体现为休止角、BFE 上升，振实/松散密度下降、可压缩性增强。相比之下，级配组因骨架更稳、细粒“适度填隙”降低有效液桥连通度，内聚增强与团聚增长的幅度显著小于单一粒度组，从而在一次/二次吸湿过程中表现出更小的性能劣化梯度与更好的流动保持性。这说明通过级配优化可在一定程度上对冲湿度带来的黏附/内聚不利效应。

双指数和威布尔模型对吸湿动力学拟合良好，表明发酵虫草菌粉的吸湿过程兼具“快速吸附-缓慢渗透/重排”的多阶段特征；双指数模型能够区分初期快速表面吸附与后期缓慢内部迁移过程[21]；威布尔模型中的形状参数（d）与尺度参数（k）可定性反映吸湿速率与达到特定含湿水平所需的特征时间，为粉体吸湿性提供可量化指标[14]。

从工艺角度，结果支持在胶囊填充、制粒与包装环节采取“粒度控制＋级配优化＋湿度管理”的一体化策，即合理控制粒径及其分布，优化粒度级配，加强环境湿度管理，可有效提升发酵虫草菌粉的流动性与填充性能，为优化发酵虫草菌粉胶囊填充工艺提供理论依据，也为其他粉体材料的工业应用提供参考[22]。

本研究以特定菌粉来源与设备参数为边界条件，未系统考察极端湿度、不同表面改性或形貌调控等对结果的影响，未来可结合颗粒形貌工程（球形化/包衣）与多尺度模拟，进一步阐明“级配-吸湿-流变”之间的定量耦合关系，并验证在连续化生产线中的可转移性与经济性。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

[1] Sandler N, Wilson D. Prediction of granule packing and flow behavior based on particle size and shape analysis [J]. *J Pharm Sci*, 2010, 99(2): 958-968.

[2] Zegzulka J, Gelnar D, Jezerska L, *et al*. Characterization and flowability methods for metal powders [J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 21004.

[3] 高健, 黄璐琦, 李哲, 等. 不同干燥方式制备巴西人参提取物粉体性质比较 [J]. 中国新药杂志, 2024, 33(4): 383-389.

[4] 罗聪, 陆海峰, 郭晓镭, 等. 粉体流动性的静力学及动力学表征研究 [J]. 化工新型材料, 2020, 48(10): 186-191.

[5] 李嘉懿, 宋汝骁, 董龙涛, 等. 药用乳糖粉体流动性表征方法的研究 [J]. 沈阳药科大学学报, 2024, 41(1): 55-64.

[6] 王嘉绍, 刘朝贤, 鲁端峰, 等. 不同粒径与含水率的烟粉颗粒流动性及影响因素 [J]. 烟草科技, 2020, 53(4): 75-81.

[7] 张力锋, 杨建伟, 吕玺, 等. 不同粒度级配的硼基粉末燃料装填特性和流动性 [J]. 火炸药学报, 2024, 47(1): 91-96.

[8] 徐冰, 崔向龙, 杨婵, 等. 质量源于设计在银杏叶片制粒工艺中的应用 (II): 颗粒关键质量属性辨识 [J]. 中国中药杂志, 2017, 42(6): 1043-1047.

[9] 王子千, 吴凡, 钟志坚, 等. 健胃消食颗粒物性参数测定与离散元仿真参数标定 [J]. 中国中药杂志, 2024, 49(24): 6558-6564.

[10] 王昌镇, 王森, 张元彬, 等. 钛合金粉末的流动性研究 [J]. 粉末冶金技术, 2016, 34(5): 330-335.

[11] Suhaidi D, Dong Y D, Wynne P, *et al*. Bulk flow

optimisation of amorphous solid dispersion excipient powders through surface modification [J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(5): 1447.

[12] 胡恢权. 基于粉体学性质的发酵虫草粉质量均一性及填充行为影响和优化研究 [D]. 南昌: 江西中医药大学, 2024.

[13] 王洁, 赵国巍, 廖正根, 等. 肿节风混合粉的粉体学基本性质与吸湿性的相关性研究 [J]. 中草药, 2014, 45(2): 188-193.

[14] 朱诗竟, 丁青龙, 狄留庆, 等. 不同湿度环境下中药浸膏粉体吸湿动力学模型拟合优选 [J]. 中草药, 2013, 44(20): 2833-2840.

[15] 朱卫丰, 陈富财, 刘文君, 等. 基于粒子设计原理的中药粉体改性研究进展 [J]. 药学学报, 2022, 57(6): 1781-1791.

[16] 陈绪龙, 赵国巍, 廖正根, 等. 不同粒径三七粉体物理特陛及体外溶出行为的比较 [J]. 中华中医药杂志, 2011, 26(9): 1971-1974.

[17] 林泳鸿, 毕金峰, 李一鸣, 等. 基于固态基质模拟体系的枣粉吸湿行为评价 [J]. 中国食品学报, 2025, 25(7): 284-294.

[18] 敖腾, 张俊芳, 赵国巍, 等. 基于多元数据分析的固体分散体粉体学性质及其与重结晶过程中相对结晶度的相关性研究 [J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(16): 2260-2267.

[19] 陈国鑫, 尧军平, 梁超群, 等. 基于实际三维微观结构研究颗粒混杂对 SiC/AZ91D 复合材料力学行为及其变形失效机理的影响 [J]. 中国材料进展, 2025, 44(8): 770-777.

[20] Stavrou A G, Hare C, Hassanpour A, *et al*. Investigation of powder flowability at low stresses: Influence of particle size and size distribution [J]. *Powder Technol*, 2020, 364: 98-114.

[21] 王雅洁, 汤成成, 贾艾玲, 等. 黄芪水提取物吸湿模型的拟合 [J]. 中成药, 2017, 39(1): 65-70.

[22] Zhang H N, Liu Y, Zhang H L, *et al*. Effect of different drying and grinding techniques on the physicochemical properties and biological activities of fungal polysaccharides [J]. *Food Med Homol*, 2025, 2(1): 9420045.

[责任编辑 郑礼胜]