

粉层发生固结的原因很多，例如运输或加工过程中的固结多数由于振动造成，此时粉体受到法向和侧向的应力。一般使用自动振实仪进行模拟，振动敲击量筒中的粉体，致使颗粒的堆积状态重排。存储过程中也会发生固结，粉体主要受到与自身重量相关的正应力。可以使用透气压头对粉体材料直接施压，模拟正应力作用引发固结来实现测试。

通常使用豪斯纳比率比较堆密度和振实密度，评价粉体的流动性，计算方法如下：

$$\text{豪斯纳比率} = \frac{\text{振实密度}}{\text{堆密度}}$$

粉体流动性的等级分类如下：

流动性	豪斯纳比率
极好	1.10-1.11
好	1.12-1.18
一般	1.19-1.25
尚可	1.26-1.34
差	1.35-1.45
非常差	1.46-1.59
不流动	>1.6

## FT4 粉体流变仪™



FT4 粉体流变仪™作为通用粉体测试仪，提供自动、可靠、全面的粉体性质表征。该信息可与加工经验进行关联，提高生产效率并有助于质量控制。FT4 专注于测量粉体的动态流动特性，还可提供剪切盒测试，具有密度、可压性和透气性等整体特性的测试能力，全面表征与工艺相关的粉体性能。

动态测试采用独特的测量技术来确定粉体的流动阻力。特殊形状的桨叶沿着既定的路径穿越精确体积的粉体。当桨叶轴向移动和旋转时，作用于其的阻力和扭矩，组合产生总流动能值<sup>[1]</sup>。



## 实验方法

评估多个行业中使用的十种粉体，采用两种方法评估不同固结方法的影响。方法 1 基于粉体振实，模拟运输过程。方法 2 直接压缩粉体，模拟长期储存。

每次测试前进行预处理，确保样品处于均质、松散的堆积状态。值得注意的是，标准的豪斯纳比率测试中，测量堆密度时不需要预处理，因此重复性容易受到操作人员的影响。

**方法 1:** 进行两项测试，第一步使用螺旋桨叶测量基本流动能（BFE），如上所述。测试同时提供了粉体松散状态的密度，即预处理松装密度（CBD）。第二步使用 Copley 振实仪振动粉体 50 次，采用与 BFE 相同的方法测量固结能。测试还提供固结粉体的密度（BD<sub>Tap50</sub>）。

**方法 2:** 使用透气压头施加 15kPa 的正应力，并且测量体积变化百分比。

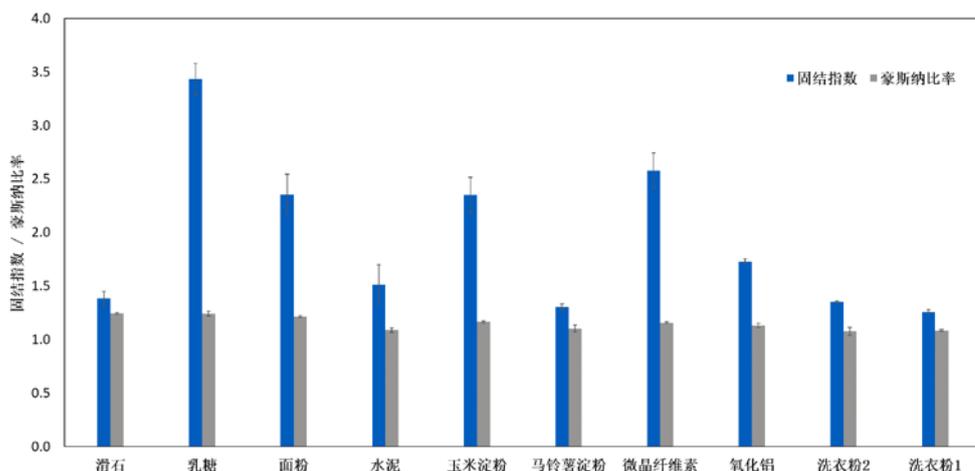
所有测试均重复 3 次，固结指数的计算公式如下：

$$\text{固结指数} = \frac{\text{固结能}}{\text{基本流动能}}$$

分别选择 CBD 和 BD<sub>Tap50</sub> 作为堆密度和振实密度来计算豪斯纳比率。

使用四分位距（IQR）量化数据的离散情况。IQR 表示数据的中位（50%）离散。较低的 IQR 值说明轻微离散，样本之间的差异有限。为了确保具有一定的代表性，计算 IQR 前需要将数据标准化。

## 方法 1：固结指数和豪斯纳比率



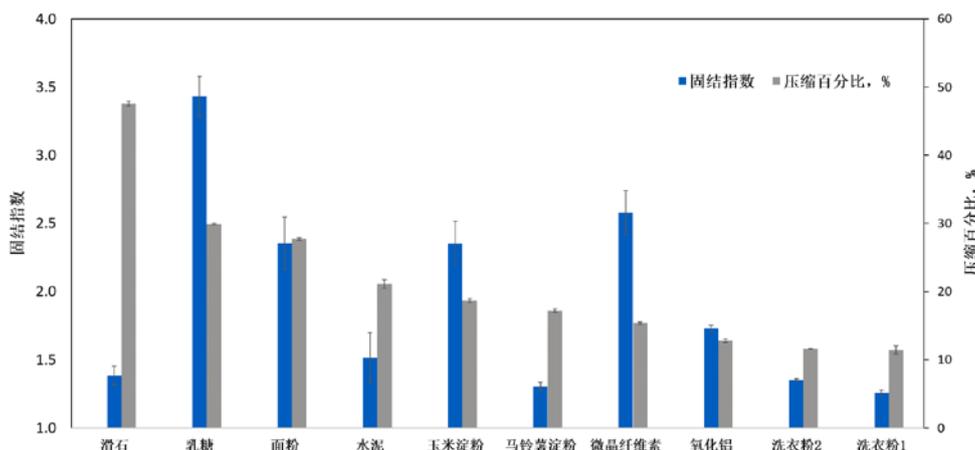
比较 10 个不同的样品，固结指数（IQR=1.0）相比豪斯纳比率（IQR=0.1）的变化更大。这说明使用豪斯纳比率来比较不同类型的材料，缺乏敏感性。

根据豪斯纳比率，滑石、乳糖和面粉三种样品的流动性“一般”，玉米淀粉、微晶纤维素和氧化铝三种样品的流动性“好”，余下四种样品（水泥、马铃薯淀粉、洗衣粉 1 和 2）的流动性“极好”。

比较固结指数，乳糖、面粉、玉米淀粉和微晶纤维素四种样品对于振动或敲击都非常敏感，固结指数>2。

通常，比较相同固结方法的不同指标，都能达到预期的趋势，比如乳糖的豪斯纳比最高，固结指数也最大。然而也有例外，滑石的豪斯纳比相对较高，固结指数却较低。所研究的材料中，密度增量无一超过 25%，然而某些样品的流动能增量却大于 200%。对于乳糖等材料，堆积状态的变化使得颗粒间相互作用增加，因此颗粒形貌将主导流动行为。仅仅密度的变化不足以反应特定过程中固结材料的流动性能。

## 方法 2：固结方法的差异



比较不同的固结方法，固结指数（振实）和压缩百分比（直压）的排序不同。例如滑石对直压更敏感，代表长期储存时可能发生问题，然而乳糖对振实最敏感，模拟了运输或加工过程中的振动。这些不同的响应可能是由于颗粒性能和堆积结构的变化：微细、粘性的粉体可能团聚，夹带更多的空气，因此对压缩更敏感。粗糙、不规则的颗粒能够有效堆积，因此不会受到明显的压缩，但当颗粒重排时，其形貌则抑制了流动性。也突出了使用与加工过程和暴露条件相关的方法来表征样品的必要性。

## 结论

粉体流动性不是材料的固有属性，而是粉体在特定设备中以其所需要的方式流动的能力。成功的加工需要粉体与过程的完美匹配，相同的粉体在一个加工过程中表现良好，而在另一个过程中却不佳的情况并不罕见。多元特性表征为理解粉体的行为变化提供了必要的基础，能够识别并量化任何单位操作中与加工性能最相关的粉体特性。

更多信息请联系应用团队。

- [1] Freeman R., *Measuring the flow properties of consolidated, conditioned and aerated powders – A comparative study using a powder rheometer and a rotational shear cell. Powder Technology, 25-33, 174, 1-2, 2007*