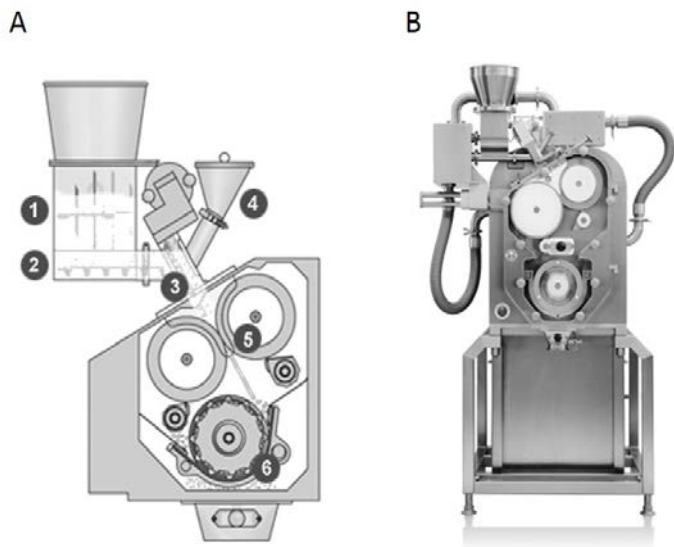


粉体混合物加工会带来诸多挑战：成分粉体在过程中的流动性可能较差，混合物容易分层或形成团块，影响混合均匀性。造粒广泛用于各行各业，具有众多应用，将多种成分混合成一种自由流动且均质的中间体产品，供下游加工使用。通常采用湿法造粒，但得到的湿颗粒必须加以干燥，并研磨成可处理的产品。这一过程既费时又昂贵，在某些情况下由于化学活性成分或热降解，甚至不可能实现。

干法造粒在减少加工和降低成本方面有着巨大优势，可用于敏感材料。然而难以确定哪些过程参数能够产生最佳的质量，从而实现不间断加工并得到高质量产品。因此，大多数设备供应商和产品制造商只能凭借以往经验和特定的试验信息来确定合适的参数。

本应用案例详细阐述了英国富瑞曼®科技和 Gerteis Maschinen+

Processengineering AG 共同展开的研究，以探寻过程参数如何影响对照品干燥颗粒的属性。



MINI-PACTOR® 辊压机  
(Gerteis Maschinen+Processengineering AG, 瑞士)



FT4 粉体流变仪™  
(富瑞曼®科技, 英国)

## 方法

对照品由 70% 的乳糖、29.5% 的微晶纤维素和 0.5% 的硬脂酸镁构成，使用 Gerteis MINI-PACTOR® 辊压机造粒而成，其中压辊间距、挤压力和压辊速度可随筛网尺寸而变化。得到的颗粒使用富瑞曼®科技 FT4 粉体流变仪™进行评估，以量化动态、整体和剪切属性。

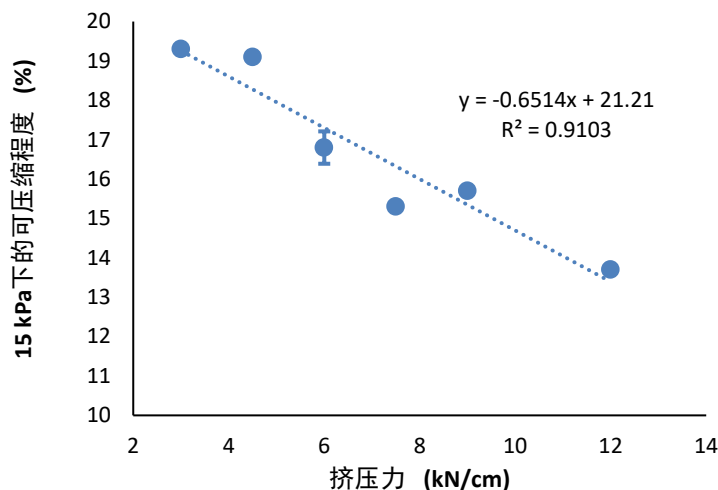
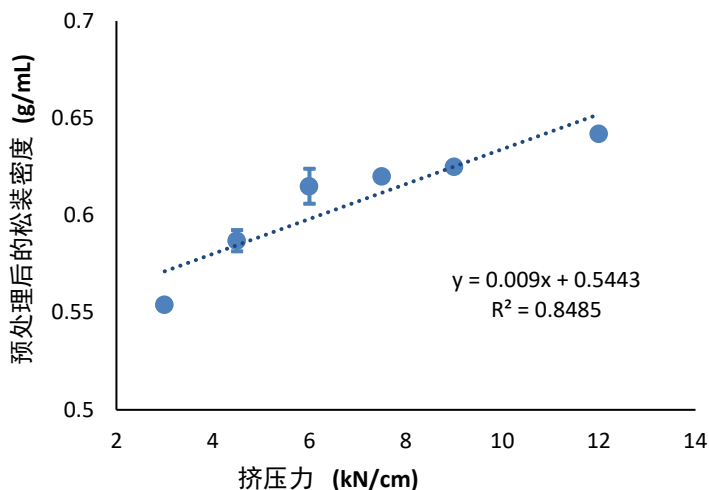
## 挤压力的影响

MINI-PACTOR® 以不同的挤压力加工六批相同原料：

	I	II	III	IV	V	VI
挤压力 (kN/cm)	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	12.0

压辊间距保持在 3 mm，压辊速度为 2.5 RPM，筛网尺寸为 1 mm。得到的六批颗粒随后使用 FT4 粉体流变仪™进行评估，研究挤压力对颗粒属性的影响。

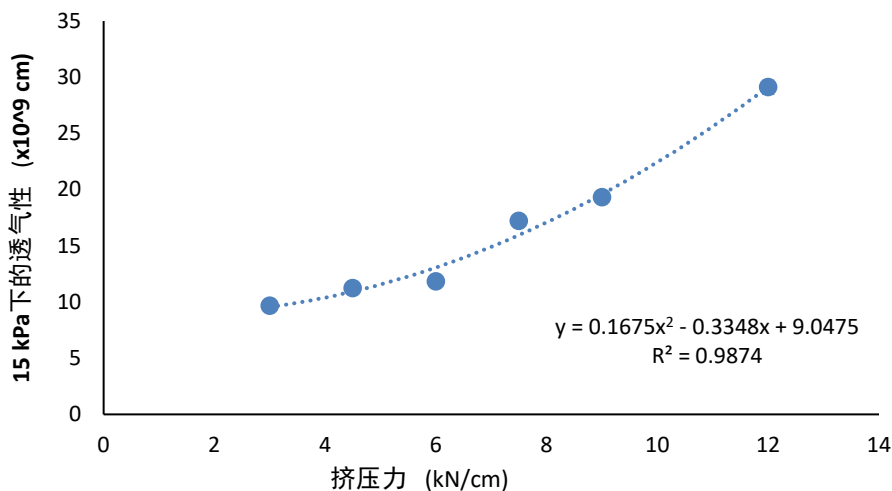
### 预处理后的松装密度和可压性



据观察，颗粒预处理后的松装密度 (CBD) 和可压性随挤压力的变化呈线性相关，挤压力越大，得到的 CBD 越大，可压性也越低。

挤压力越大，得到的颗粒越均匀，也能更高效地内部排列。这种高效的自组装可降低气孔，提高材料的松装密度，减少颗粒受应力影响时可供移动的空间。

### 透气性



据观察，透气性和挤压力之间存在密切联系，挤压力越大，透气性越高。

如果使用较大的挤压力生产颗粒，将生成更耐压的粉料。也就是说，当粉料受外部应力时，可维持颗粒间通道，以便空气自由流通。

结果显示挤压力和松装密度、透气性和可压性之间存在直接的相关性。随着挤压力增大，可压性降低，透气性和松装密度增大。这些属性都是高效自组装的标志，自由流动的材料通常具有相关特性。

与动态流动和整体数据相比，剪切特性几乎无影响，剪切盒测试结果未显示样品之间存在差异，并且壁面摩擦角和挤压力之间不具有相关性。剪切盒主要用于评估连续性、粘性粉体在高应力条件下流动的起始情况，因此，与动态低应力过程之间无相关性也是合理的。

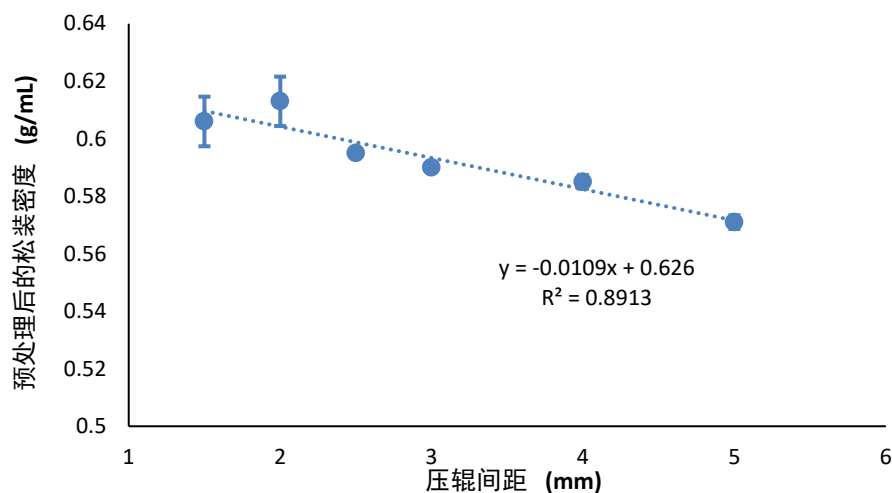
### 压辊间距的影响

MINI-PACTOR®使用不同的压辊间距加工六批相同原料：

	I	II	III	IV	V	VI
压辊间距 (mm)	1.5	2	2.5	3	4	5

挤压力保持在 4.5 kN/cm，压辊速度为 2.5 RPM，筛网尺寸为 1 mm。得到的六批颗粒使用 FT4 Powder Rheometer®进行评估，研究压辊间距对颗粒属性的影响。

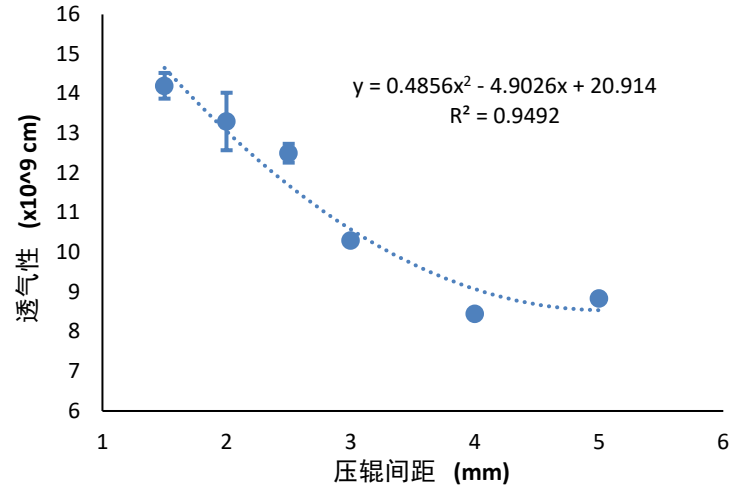
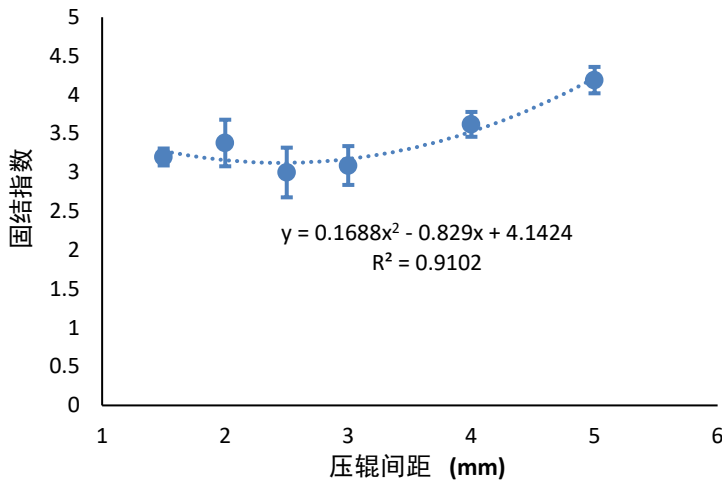
### 预处理后的松装密度



颗粒的松装密度随压辊间距的增大而减小，这表示间距越大，所得颗粒的一致性越差，粒径分布较宽。

粒径分布较宽的材料通常自组装的效率较低，易于夹带空气，松装密度降低。

## 固结指数和透气性



据观察，固结指数和透气性与压辊间距之间存在一定的关系，压辊间距越大，对振动固结越敏感，透气性也越低。

再次证明了如果压辊间距较大，产生的颗粒粒径分布较宽，导致内部重新排列不均匀，内部夹带更多空气。当受到振动作用时，颗粒极易重新排布，并重新组成一种更有效排列的结构，排出空气并显著增大流动能量。此外，如果自组装的结构不均匀，将无法构建稳定的空气通道，导致透气性降低。

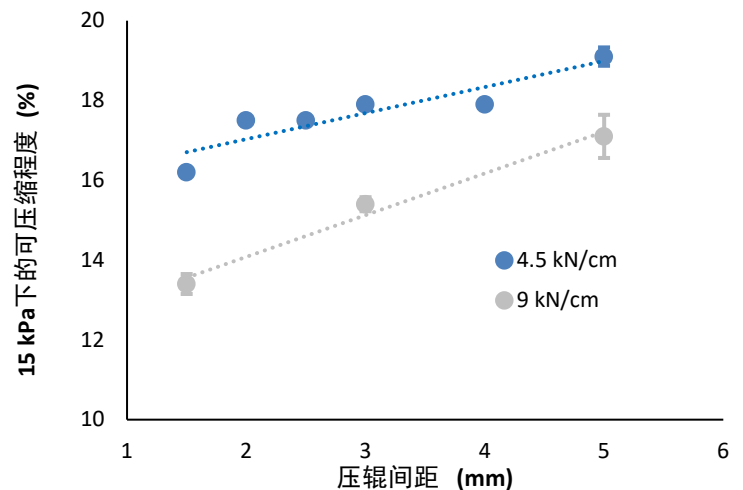
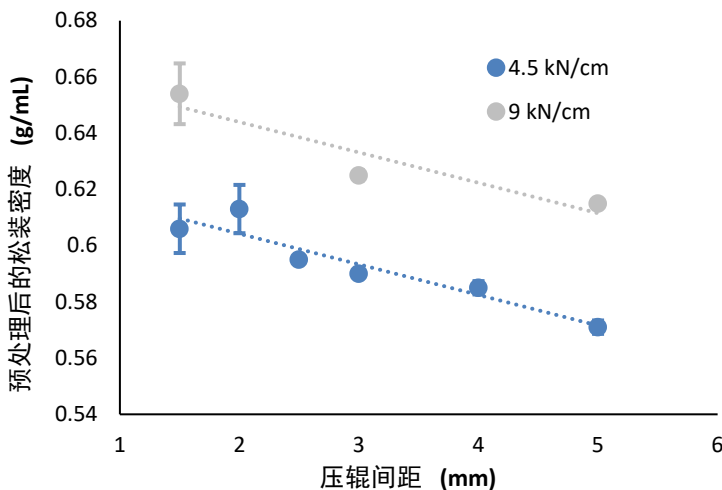
随着压辊间距的增大，由于压辊之间形成的固结部分不一致，得到的颗粒也不均匀。这很可能导致颗粒的粒径分布、形状和表面质构出现更大差异，表现形式为颗粒的自组装效率降低 (正如高固结指数、低透气性和低松装密度所展示的结果)。

## 挤压力和压辊间距的变化

使用不同的挤压力和压辊间距评估九批相同原料，与仅改变压辊间距或挤压力时得到的结果相比，考察是否遵循相似的变化趋势。

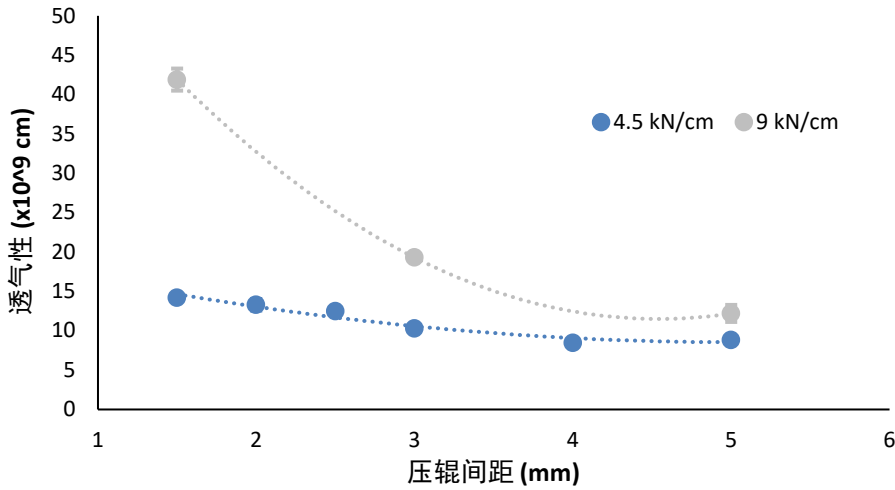
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
压辊间距 (mm)	1.5	2	2.5	3	4	5	1.5	3	5
挤压力 (kN/cm)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	9	9	9

## 预处理后的松装密度和可压性



与 4.5 kN/cm 挤压力相比，使用 9 kN/cm 挤压力在不同压辊间距下生成的颗粒松装密度更大，可压性更低，与最初结果吻合。比较 4.5 kN/cm 和 9 kN/cm 的挤压力下，压辊间距和松装密度之间的线性关系，表明压辊间距和松装密度之间的关系与挤压力无关。但压辊间距和可压性之间未显示这一独立相关性。在 9 kN/cm 挤压力下，可压性随压辊间距的增大而急剧增大，说明在较大的挤压力下，压辊间距对颗粒属性的影响更大。

## 透气性



与在 4.5 kN/cm 挤压力下生成的颗粒相比，在 9 kN/cm 挤压力下生成的颗粒透气性更好，表明较高的挤压力下，生成的颗粒内部排列更均匀，透气性更好。这一结果也验证了之前观察到的压辊间距与透气性之间的关系，但在较高的挤压力下，曲线的斜率更大，进一步证实了高挤压力下压辊间距对颗粒属性具有更大的影响。

## 结论

“质量源于设计”的理念要求充分理解材料和加工过程之间的关系，以便能够控制和优化工艺性能，确保终产品的质量。此处得出的结果证明，我们可以确认关键过程参数用以优化辊压造粒过程，从而生成颗粒的特性可直接影响下游操作性能和终产品的关键质量属性。

据观察，FT4 测得的流动特性存在明确且可重复的趋势，展示了过程参数如何对颗粒流变属性产生可预见性的影响。样品的透气性、可压性和预处理松装密度与辊压机的运行模式有着强烈的相关性，总而言之，较小的压辊间距配合较大的挤压力能够产生更均匀、一致的颗粒，形成更高效自组装的粉体，促使其自由流动。

该研究展示了粉体流变学在全面、多变量粉体特性表征方法中的价值。流动性不是材料的基本属性，它反映的是多种属性对于粉体在特定设备中整体表现的影响。某些属性的微小差异可能导致工艺性能发生显著变化，这意味着需要多种特性表征方法，所得出的结果能够与过程评价相关联，从而产生对应于可接受的过程特性的参数设计空间。

更多信息可拨打电话 +86 (0) 21 2108 5884 或通过电子邮箱 [info@freemantech.com.cn](mailto:info@freemantech.com.cn) 联系应用团队。