

**freemantech***nology*  
a **mi** micromeritics® company

## 预测螺旋加料器中的流动性能

在粉体处理行业中，螺旋加料器常用于控制材料从料斗到后续过程阶段的流动。准确、均匀地将材料送入反应系统、混合机和其它处理设备是维持最佳条件、匀速高质量生产的关键。

但预测进料速度一直都依赖于工程评估，而这基于经验和推断出的或先前的性能信息 – 它们要么来自于中试规模试验，要么来自从早期安装收集的数据。这可能导致设备不能满足目标设计要求，导致不符合标准的操作，或极端情况下，整个过程无法运转。

为更准确地预测给定进料过程中粉体的进料速度，一种方法是使用统计多元模型来评估粉体行为与过程性能的关系。但在许多研究中，使用的松装粉体特性 (例如，休止角或孔口流率) 都过于简单，它们难以代表粉体在加料机中所受的条件。要开发稳定的统计模型，需要找到一种方法，精确量化在过程相关条件下粉体的响应。

FT4粉体流变仪™是一种通用型粉体测试仪，可自动、可靠且全面地测量粉体材料特性。这些信息能够与加工经验相联系，以提高加工效率，帮助实现质量控制。FT4专于动态流动属性的测量，同时集成了剪切盒，能够测量密度、可压性和透气性等整体属性。

该研究展示了如何基于稳定的粉体流变特性测量和标准多元线性回归 (MLR) 分析生成设计和操作模型。



## 量化加料机性能

在两台不同的螺旋加料机中运行五种粉体 (氢氧化钙、麦芽糖糊精、牛奶蛋白、纤维素和柠檬酸钙)，以确定在相当于80 Hz螺旋转速下的体积进料速度 (L/hr)。体积流速 (L/hr) 则通过测量质量流速 (单位：kg/hr) 和堆积密度后计算得到。

所使用的两台螺旋加料器分别是DIWE-GLD-87 VR全螺纹单螺旋加料器 (使用3号加料管) (图1) 和DIWE-GZD平底双螺旋加料器 (使用12x13.5mm加料管，带锥形芯杆) (图2) (瑞士Gericke AG公司)。

还使用FT4粉体流变仪评估五种材料，并运行MLR分析，评价FT4测得的参数与体积进料速度之间的关系。然后使用另外两种粉体 (乳糖和水泥)，比较预测的体积进料速度与进料机中实际的进料速度，测试所得到的模型



图1 - GLD加料机



图2 - GZD加料机

## 测得的测试数据

材料	动态参数								整体参数				剪切参数					加料机参数		
	BFE mJ	SE mJ/g	SI	FRI	AE <sub>40</sub> mJ	AR <sub>40</sub>	NAS s/mm	CE <sub>50tap</sub> mJ	BD <sub>50tap</sub> g/mL	CBD g/mL	CPS %	PD <sub>15kPa</sub> mbar	UYS kPa	MPS kPa	FF <sub>9</sub>	Cohesion kPa	AIF <sub>9</sub>	WFA <sub>9</sub>	GLD L/hr	GZD L/hr
氢氧化钙	354	6.9	1.3	2.4	65	4.1	0.417	460	0.538	0.499	25.2	65.3	5.9	18.2	3.1	1.5	35.2	30.8	185.2	33.02
麦芽糖糊精	1282	5.2	1.1	1.2	13	107.3	0.156	1341	0.608	0.557	7.1	0.5	0.9	16.4	18.6	0.2	36.9	27.4	138.9	29.88
牛奶蛋白	330	8.5	0.9	1.4	102	3.3	0.182	613	0.311	0.267	24.3	9.1	4.0	20.7	5.2	1.1	32.3	24.6	128.7	18.67
纤维素	630	8.9	0.9	1.3	19	46.0	0.619	4124	0.376	0.327	22.2	4.0	6.7	22.1	3.3	1.6	39.4	17.5	115.8	34.98
柠檬酸钙	680	12.5	1.1	1.4	225	3.0	0.077	914	0.261	0.234	41.6	37.8	8.1	22.6	2.8	1.9	40.5	41.0	50.13	10.39

## 多元线性回归

MLR是一种根据产生影响的自变量 (在本例中为测得的粉体属性) 量化因变参数 (y) (在本例中为体积进料速度) 定义模型的数学处理方法。

该处理方法为每个参数生成一个p值, 它代表参数对关系的贡献在统计显著性上的可能性。p值越低, 参数对关系的影响越显著。根据该研究目的, 我们将0.1作为p值的下限值。剔除p值高于该值的参数, 以确保关系稳定。

## 结果 - GLD加料机

对于GLD加料机, MLR得到下列关系。

$$\text{进料速度} = 49.54 \text{ FRI} - 13.81 \text{ SE} + 163.8$$

( $R^2 = 0.9466$ )

$R^2$ 是模型和数据之间拟合优度的衡量指标。值越接近上限值1, 表明拟合越好。该关系说明, 在所有测得的粉体特性中, 只需要两种动态流动特性 - 流速指数 (FRI) 和比流动能 (SE) 便能稳定预测加料机的性能。FRI描述粉体抵抗流动变化的程度, 它是流速或剪切速度的函数, 通过增大或减小粉体测试仪螺旋桨叶的叶端速度来模拟不同的流速。FRI值远大于1表示当粉体流动越慢, 流动阻力越大。在本研究中评估的所有粉体得到的FRI都大于1, 因此, 它们都表现出这种“剪切稀化”行为。

SE反应了在无约束状态下粉体如何流动, 它主要受颗粒之间机械锁合和摩擦作用的影响。

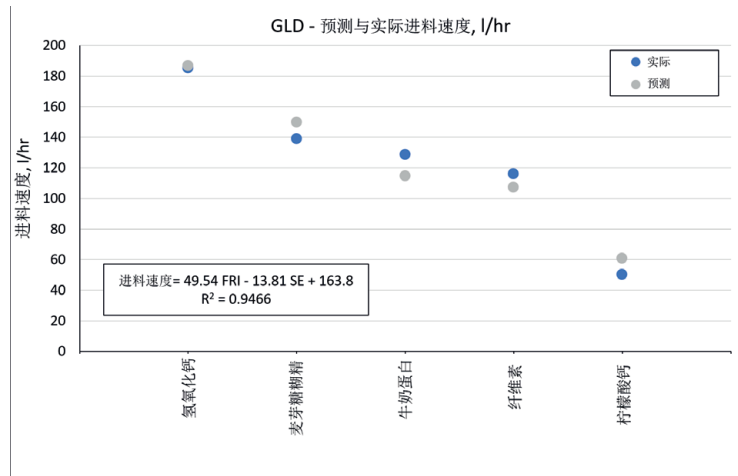


图3 - GLD加料机的预测和实际进料速度

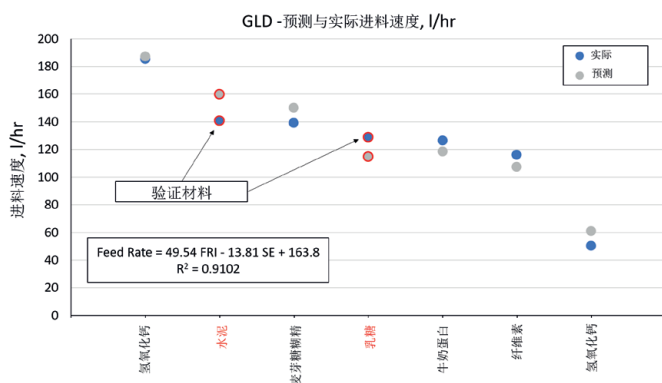


图4 - GLD加料机中所有七种材料的预测和实际进料速度

图3显示了五种粉体测得的进料速度以及推导模型的预测值。如 $R^2$ 值所表明, 预测值准确描述了粉体在GLD加料机中的性能。

当使用关系预测另外两种材料的行为时 (图4), 合并所有七种材料的数据时, 仍得到 $R^2$ 值大于0.9, 确认预测性能和实际测得性能吻合较好, 证明了从粉体流动性预测体积进料速度的可行性。

## 结果 - GZD加料机

重复相同过程可得到用于预测GZD加料机性能的模式。从中观察到更为简单的关系，充气能 (AE) 是唯一的相关参数。

$$\text{进料速度} = -0.1114 \text{ AE}40 + 34.82$$

( $R^2 = 0.8383$ )

AE是当空气以预定的线速度流经样品充气时被测材料的流动能 - 在本案例中为40 mm/s, 从而为AE40。粘性粉体产生的AE值通常较高, 这是因为充气几乎没有改变粉床的排列结构。对于自由流动的粉体, 当粉体流化时, AE可能接近0 mJ。被测材料的AE值范围较大, 但所有材料的AE和体积进料速度之间保持稳定的关系。

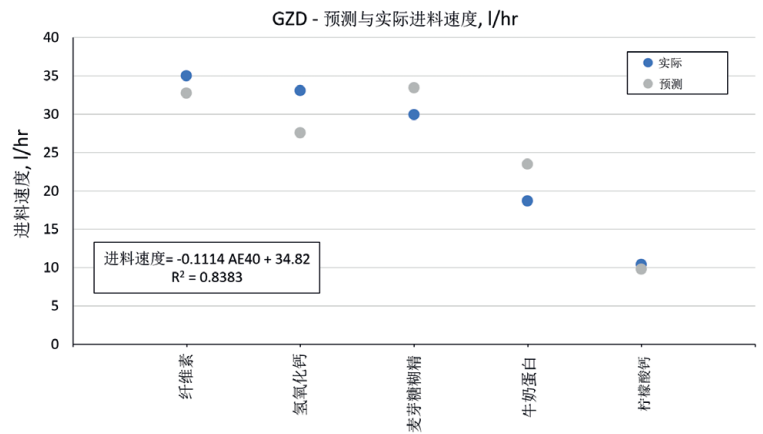


图5 - GZD加料机的预测和实际进料速度

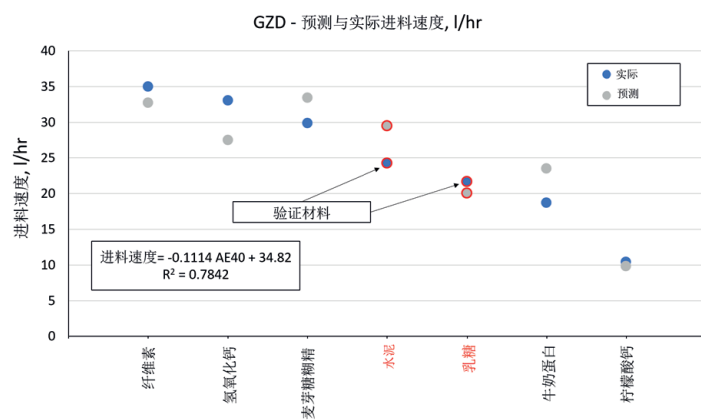


图6 - GZD加料机中所有七种材料的预测和实际进料速度

图5显示五种粉体实际的进料速度以及推导模型的预测值。如 $R^2$ 值所表明, 预测值再次准确地描述了粉体在GZD加料机中的性能。

与GLD加料机一样, 进一步拓展研究, 验证模型预测水泥和乳糖体积进料速度的能力 (图6)。如前文, 这种预测模式中的模型表现也很稳定。

## 结论

该研究结果通过不同设计的螺旋加料机, 证明了建立可测量粉体特性与体积进料速度之间的稳定关系, 具有可行性。每种螺旋加料器都在粉体上施加不同的条件, 都能反映在特殊粉体特性上, 并且均与预测性能相关。这表明, 简单的数字, 或者甚至单一的技术, 不足以完全描述在典型分体处理应用中各种操作下的粉体行为。

该方法可作更广泛地应用, 用以确定预测各种粉体处理设备性能的相关性。多方面的粉体特性表征可为此类工作提供关键的基础, 以识别和量化在各种单元操作中与过程性能最相关的属性。

更多信息可拨打电话+86 (0) 21 5108 5884 或通过电子邮箱info@freemantechology.cn联系应用团队

欲知更多信息, 或预约FT4演示, 欢迎联系:

英国富瑞曼科技有限公司上海代表处  
上海浦东新区民生路600号船研大厦1505-1509室, 200135

www.freemantechology.cn

电话: +86 (0) 21 5108 5884 电子邮件: info@freemantechology.cn

更多信息有关Gerike产品信息请联系:

Gerike AG, Althardstrasse 120, CH-8105 Regensdorf-Zurich, Switzerland  
www.gerike.net

电话: +41 44 871 36 36

电子邮件: info@gerike.net