

## 评价粉体测试工具包：剪切测试

承接上一篇综述文章，我们已经讨论了传统粉体测试工具包究竟能否满足当下粉体加工者的需求。这篇文章中将开始讨论剪切测试。

剪切测试起源于 Jenike 在 20 世纪 60 年代为解决储存容器卸料问题而展开的创新工作。其所开发的技术首次使用数值方法确定粉体加工设备的规格，为该设备的设计提供支持。开发一种设计演算法使得料斗和料仓实现可控的卸料是一项重大的挑战，相关后续的研究工作也验证了该方法的卓越性。虽然卸料和料斗设计仍然是一门不尽完美的学科，但是，50 年前开发的方法经受了时间的考验，至今仍在使用且未有重大变化。

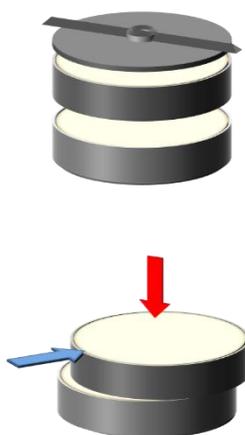
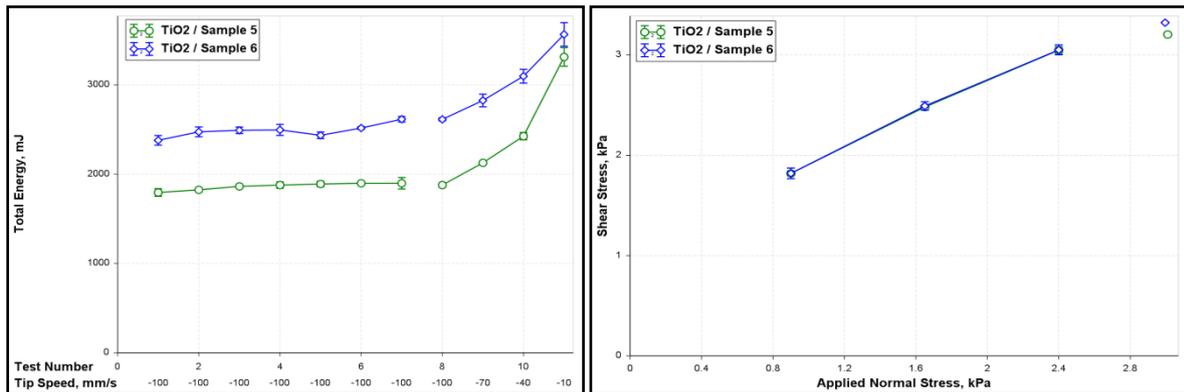


图 1 - 传统剪切室

简单来说，剪切测试测量了相对于一个粉体平面剪切另一个固结平面所需的力。类似的方法也用于测量壁面摩擦（即设备或容器结构材料表面与粉体之间的摩擦力），以提供料斗设计所需的大部分数据。料斗底部的粉体由于其上方物料的重力作用而发生固结，粉体承受此种应力，同时将应力传递至粉床内，并且粉体与容器壁面接触时也会承受一定的应力，可见这些测试方法是极其相关的。

构想出剪切测试之后的几十年，对于与加工工艺相关的粉体表证的极大需求也已促使剪切测试的应用远远超于最初。这点固然可以理解，但也使得这项技术的某些局限性成为关注的焦点。

一个问题是，对于粘性粉体而言，剪切测试最为适合，也最精确。对于粘性的材料，测得的剪切力相对较大。然而对于非粘性的样品，剪切力则逐渐减小，此时测得的结果——流动函数对应的“自由流动”范畴则成为主要参数，涵盖了广泛的自由流动行为，可见剪切测试不像动态表征那样具有区分性（参见下图）。



另一个更加重要的问题无疑是，剪切测试期间所使用的条件并不能代表流化床或重力下料。对于某些工艺而言，粉体对空气的响应至关重要，这也不能使用剪切分析直接研究。更广泛地说，试图从剪切数据中推断出与测试环境明显不同的真实条件下的粉体行为，这种做法可谓既不精确，又不高效。

本文意图并不在于争论剪切测试其设计目的和价值，事实上，剪切测试也确实帮助人们深入了解以及普遍研究粉体性质，确实发挥了重要的作用。然而剪切分析已经开始达到极限，所以我还是认为综合测试并且采用其他的测试方法（特别是动态测试）更适合表征粉体。认识到这些局限并采用最合适的表征技术才是最为关键的，只有这样加工业者才能够实现更为高效的生产。