追求准确无误的检测结果

经过改进的粉末检测技术可以实现高效的配方调节与更好的供应链管理——粉末状食品的质量与流动性有着密不可分的关联。单轴剪切测试作为一种精确且可重复的自动化检测方法，可用于精确测量粉末的流动性。

文 / Rajeev Dattani

PROCESS-Tip

* 更多信息请访问：foodtec.vogel.com.cn
* 反馈编码：A211024

粉末的种类多种多样，无论是奶粉、鸡蛋粉、可可粉、淀粉、增稠剂还是防腐剂，都有着其独有的稳定性与可保存性。正是由于这一点，使得食品行业的许多事情变得更加容易。消费者越来越关注饮食的健康和可持续性，并且以身作则，践行着自己的消费行为：减少糖和盐的摄入、追求纯素食品以及避免误食过敏食物。

为了适应消费者饮食习惯的变化，仅改变食品配方是远远不够的，食品行业还必须检查供应链以及原产地和生产方法。在对供应商及原材料的选择标准上，也需更加严格。

目前而言，用以检测粉末质量和可加工性的方法，更多的是基于人工技术。所以得到的结果也有着明显的缺陷，主要是在可重复性和相关性方面。

如果一家食品生产企业想要对现有的供应链加以管控并有意开发易于机器加工的新配方，那么一项精确、可重复并且能够快速检测粉末质量的技术是必不可少的——这其中也包括了与过程相关的检测方案。

图 1 Freeman Technology 公司的单轴粉末测试仪，用于粉末的剪切测试

粉末流动性在新配方的开发中扮演着重要的角色。因为它关

本文作者系英国图克斯伯里 Freeman Technology 公司应用专家。

系到能否生产出均匀的混合物，这与工艺和产品息息相关。

传统的检测方法，通常不能得到足够的信息。例如，测定休止角（AoR）、堆积密度和压实密度或使用流量测量漏斗。

传统的检测方法

所有这些传统检测方法的局限性都相互类似，并且包含了许多错误信息。由于它们大多都是手动进行的并且缺乏标准化，这就导致了用户得到的结果可变性高、可重复性差。通气、离析和固结影响着填料的结构，且与流动性的操作相关。因此很难将检测结果相互比较。

粘性粉末与具有不同湿度的材料的敏感性和适用性是另一个老生常谈的话题。粘性大、流动性差的粉末很容易引起产品质量问题，并且难以检测。在测定AoR时就会遇到这种问题，散装材料锥体内会产生多个角度，从而导致结果不准确。在压实的情况下，如果无法保证料位的测量精度，那么将会导致测量结果产生矛盾，并且极具误导性。

聚焦于剪切测试

那么食品企业应该选择哪种测试方法呢？剪切测试作为目前行业中应用最为广泛的技术，所能提供的升级选项也是最容易的。这项技术于20世纪60年代问世，主要用于优化料斗设计，也可用于测量固结粉末从静态转变为动态的难易程度。

剪切测量测量的是一个固结粉末平面相对于另一个平面剪切所用的力。再利用外推法可以计算出自由屈服强度（Unconfined Yield Strength，UYS）和流动函数（Flow Function，FF；是反映体积密度与固结应力关系的函数）。

剪切测试的限制

凭借良好的剪切单元设计，剪切测试的可重复性和再现性明显高于传统技术。既可用于改变固结压力和确定由此产生的粉末行为，也可用于控制测试环境。

然而，受限于使用的仪器，手动测试既费时又费力，并且经数学计算后，测量误差也会随之放大。如果把每次测量所需的培训和操作时间合计到仪器成本中，那么从传统技术转换到剪切单元分析，成本将有所上升。

单轴剪切测试

单轴剪切测试是一种粉末测试技术，与剪切单元有着相同的测量方式，直接测量即可生成UYS，而无需数学演算。高度自动化的单轴粉末测试仪（UPT）基于单轴剪切测试技术开发而成，便于操作人员使用，如图1所示。相对于剪切单元而言，单轴剪切测试在投资成本和培训要求上也更具优势。此外，这项技术还显著缩短了测量时间。这意味着，每次测量的成本更低，仪器的测量效率更高。

单轴剪切测试的原理

单轴剪切测试的原理为：将样品装入剪切缸后，通过施加最大主应力（Major Principal Stress，MPS；记为 σ_1），将其压成均匀致密的粉末柱。撤掉剪切缸后，应力也随之消失，然后在独立的、固结的粉末柱上施加垂直的压缩应力（记为 σ_c），如图2所示。

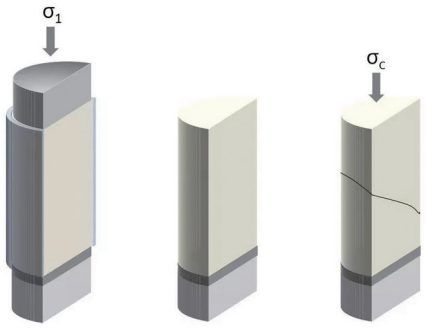

图2 单轴剪切测试原理

粉末柱断裂时的压缩应力即为粉末的单轴UYS（uUYS）。可压缩性（即粉末密度的变化）可以用相同的仪器测量。粉末柱体积发生的变化与所施加的应力有关。

与非粘性粉末相比，粘性粉末具有相对较强的颗粒间作用力，并可形成不易断裂的粉末柱。uUYS可用于量化颗粒间作用力。

在实验室中，可以测定粉末的流动性，并将不同粉末的流动性进行排序。uUYS近似于UYS，但由于测量条件和错误日志不同，在数值上也会存在差异。

对比研究

一项研究检测了单轴粉末测试在比较不同奶粉的流动性时的表现。为了找出一种全脂奶粉的替代品，实验对4种市售奶粉进行了单轴剪切测试（每种奶粉的N值均为3），测定了其流动性。

4种奶粉分别为椰子奶粉、山羊奶粉、杏仁奶粉及有机全脂奶粉，每个样品经过30 s的固结后，确定粉末柱断裂所需的压缩应力。测得的uUYS与MPS函数如图3所示。

流动性

从图3可知：椰子奶粉与有机全脂奶粉的流动性差异较大；杏仁奶粉和山羊奶粉的流动性则较为接近。uUYS从低到高依次是：杏仁奶粉、有机全脂奶粉、山羊

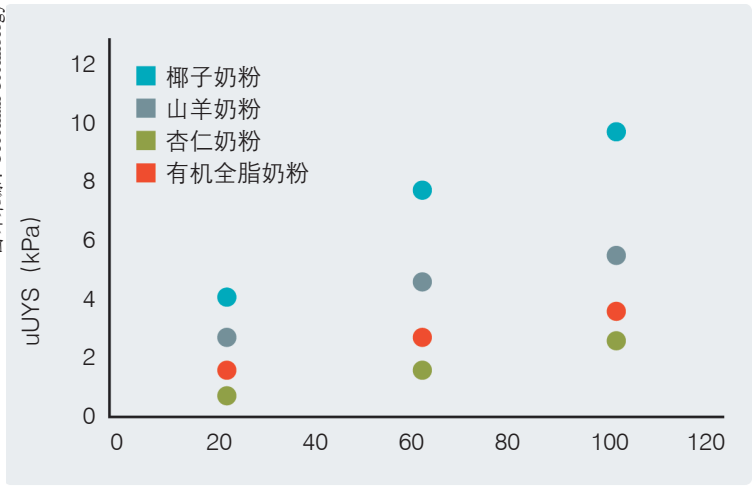

图 3　4 种奶粉的 uUYS 与 MPS 函数图

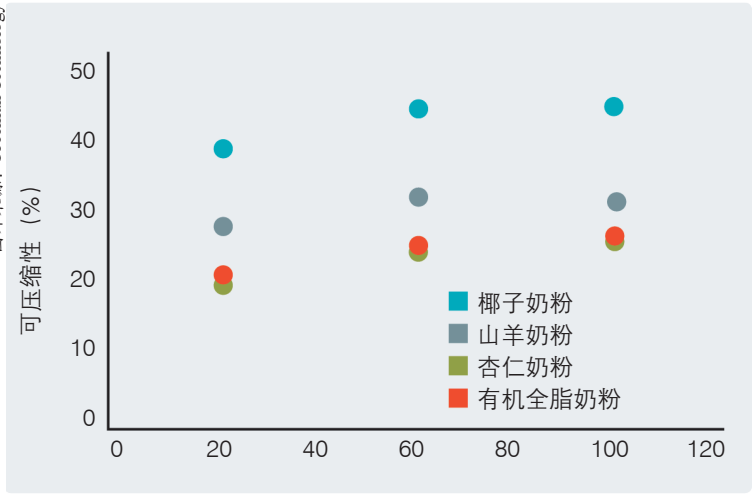

图 4　4 种奶粉固结 30 s 后的可压缩性

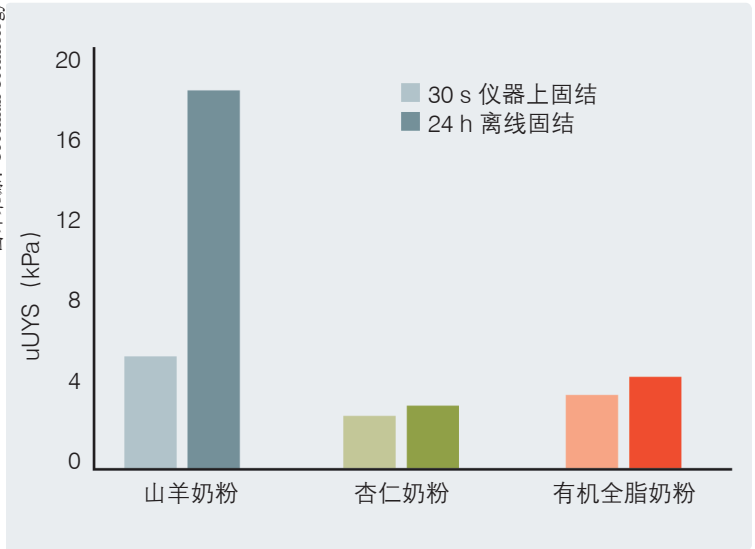

图 5　3 种奶粉固结 30 s 与固结 24 h 后的 uUYS 差异

奶粉和椰子奶粉。相对的，随着 uUYS 的升高，奶粉的流动性会随之降低，这也说明杏仁奶粉的内聚力最低。

可压缩性

为了确定 4 种奶粉的可压缩性，需要将每个样品再次固结 30 s，如图 4 所示。结果表明：椰子奶粉具有最大的内聚力；杏仁奶粉和有机全脂奶粉具有相对相似性。为了区分 3 种性质相近的粉末，实验中还使用到了 Freeman Technology 公司的专用配件（Consolidation Station）。在 100 kPa 下，对样品进行 24 h 的固结，测量其 uUYS。固结 30 s 与固结 24 h 的 uUYS 差异如图 5 所示。

由图 5 可以得知：山羊奶粉的固结时间最长，其变化也最大；杏仁奶粉和有机全脂奶粉在加工和处理方面具有非常高的相似性。这也是最有趣的一点，脂肪含量分别为 20.5% 和 26% 的杏仁奶粉和有机全脂奶粉的表现最为相似。

椰子奶粉的脂肪含量非常高，高达 42%，这可能是造成粉末行为差异的原因之一。然而，山羊奶粉的脂肪含量最低，仅为 11%。故可以得出这样的结论：影响奶粉特性的不仅有脂肪含量，还有其他因素。

相比于剪切单元的方法（耗时数天），单轴剪切测试仅需一天时间，即可完成 4 种粉末 uUYS 的精确测量。值得一提的是，离线固结样品的方法进一步提高了实验效率。这些仪器在样品制备期间还可用于其他测试。

该研究证明了单轴剪切测试是一种简单、灵敏的检测技术，其所获得的数据可靠，实验可重复性高，测量时间短，非常适用于测量粉末的流动性。