

## 利用废弃蛋糕生产生物乙醇的建模优化问题

随着化石燃料（石油，天然气和煤炭等）的长期消耗而走向枯竭，世界对于乙醇的需求日益增加。生物乙醇，即通过微生物发酵将各种生物质转化的燃料酒精，能够单独作为汽车燃料使用，或者与汽油混配制成乙醇汽油。乙醇等生物质能源的研究和生产，已是 21 世纪人类面临的亟需解决的重大问题。

一直以来，人们利用玉米和甘蔗等通过酶解和发酵实现生物乙醇的生产，造成了农作物（如玉米）价格上涨及地区食物紧张局势。因此，探索玉米秸秆、废弃木材、废弃食品等废弃生物质作为廉价原料生产生物乙醇，具有重要的实际意义[1]。食品废弃物是餐厨垃圾中的一类有机固体废弃物，将其作为生物乙醇生产的基质，近年来备受关注并开展了许多实际研究[2-3]。特别是 Han 等在文[3]中专门针对废弃蛋糕生产生物乙醇开展了应用研究，废蛋糕富含有机氮和碳，是生产生物乙醇的良好基质。

废弃蛋糕生产乙醇主要分两步：酶解得还原糖和发酵生成酒精，具体实验步骤如下（忽略杀菌、调整 pH 值等环节）：

**第一步， $\alpha$ -淀粉酶进行水解。**在容积均为 0.5 升（L）的三个生物反应器中，分别加入 50 克（g）磨碎的废蛋糕用于水解。每个器皿中加入不同体积（按比例为 0.1mL/L, 0.4mL/L, 0.8mL/L）的  $\alpha$ -淀粉酶，通过搅拌和保持适当温度下开始水解，获得含还原糖（RS, Reductive Sugar）的水解液。通过专门的设备分析其化学含氧量（COD, Chemical Oxygen Demand）和还原糖（RS）的浓度，附件 data01.xls 中给出了三个器皿不同体积比的酶作用下 200 分钟内分时刻的 COD 和 RS 的浓度值。

**第二步，酵母发酵生产乙醇。**选取容积均为 0.5L 的三个发酵罐，分别注入废蛋糕水解液（不一定直接用第一步的水解液，因为底物——还原糖 RS 的初始浓度值有变化），分别添加相同浓度相同体积的酵母溶液（同为 10 mL），在适宜温度和搅拌速度下进行发酵生产生物乙醇。附件 data02.xls 中记录了 4 天内三组 COD、RS 和乙醇浓度值。

通过对实验的简单了解及数据分析，请数模团队同学完成下面几个问题：

**问题 1**，本实验中的废蛋糕水解液是生产乙醇的唯一原料，还原糖（RS）的含量直接决定了乙醇的产量，而化学含氧量（COD）是衡量水中还原性物质（有机物）的一个重要指标，请根据 data01 中的数据分析 COD 与 RS 之间的关联性。

**问题 2**，对于废蛋糕水解液中的还原糖（RS）浓度问题，请构建合适的模型来刻画 RS 浓度随时间变化规律，给出达到最高值的时间及浓度值，同时分析  $\alpha$ -淀粉酶的加入量对 RS 浓度值产生的影响，并将理论预测值与实际数据进行比较分析。

**问题 3**，乙醇发酵过程大都依据菌体（酵母菌）浓度、底物（RS）浓度和酒精浓度构建动力学模型，如 Monod 模型，Logistic 模型或 Gompertz 模型等等[4]。但是，本实验只记录了化学含氧量（COD）、底物（RS）和乙醇的浓度值数据（见 data02.xls），为了预测酒精达到产量最高值的时间，请你们设计合适的模型，分析并获得 RS 不同初始浓度下的酒精产量最高值以及达到的时间，同时选取模型中合适的参量讨论其对酒精产量的影响。

**问题 4**，发酵过程中如果底物（RS）浓度过高，会对菌体（酵母菌）生长产生明显的抑制作用，即会使得发酵反应出现滞后现象，比如文献[3]中所提及的出现固定相现象（见文[3]中图 4 第三幅图示）。为了实现最短时间内使得酒精产量达到最高值，请通过建模分析获得最佳的底物（RS）初始浓度值。另外，如果还有其他措施或控制方法，请给出并说明理由或通过建模分析。

### 参考文献：

[1] Kim J.H., Lee J.C., Pak D., Feasibility of producing ethanol from food waste. Waste Management 31(2011): 2121-2125

[2] Uckun Kiran E., Liu, Y., Bioethanol production from mixed food waste by an effective enzymatic pretreatment. Fuel 159(2015): 463-469

[3] Han W., Xu X., Gao Y., He H., Chen L., Tian X., Hou P., Utilization of waste cake for fermentative ethanol production. Science of the Total Environment 673 (2019): 378-383

[4] 丁乾坤，酒精发酵产物动力学模型的研究，哈尔滨工程大学硕士论文，2012.3

### 附注:

1.  $\alpha$ -淀粉酶, 也称液化酶、 $\alpha$ -1, 4-糊精酶, 一种黄褐色固体粉末或黄褐色至深褐色液体, 含水量 5%~8%。溶于水, 不溶于乙醇或乙醚。主要用于水解淀粉制造饴糖、葡萄糖和糖浆等, 以及生产面包、糊精、啤酒、黄酒、酒精、酱油、醋、果汁和味精等。

2. 化学含氧量 (COD)、底物还原糖 (RS) 和乙醇的浓度的检测方法说明: COD 浓度采用主流方法测定如美国公共卫生协会 (APHA)、美国水利工程协会 (American Water Works Association)、水环境联合会 (Water Environment Federation) 等标准方法; RS 浓度的分析方法是二硝基水杨酸法; 乙醇浓度采用的是气相色谱仪 (GC-112) 进行检测。

3. 为保证每个容器中的反应都能成功实现, 不仅需要保持实验装置系统的稳定性, 还需要保持一定的温度以免碳化, 这里基本控制在  $90^{\circ}\text{C}$ – $100^{\circ}\text{C}$  之间, 同时还需要适当的搅拌速度 (如 200 转/分或 400 转/分), 故实验装置增配了相应的搅拌系统及温控系统等。另外, 各成分的检测分析系统也需要按照国际通用标准进行设计, 此处不详述。

4. 废蛋糕生产生物乙醇的酶水解的时间比较短, 实验用时大概 200 分钟; 酒精发酵时间比较长, 实验耗时大约 100 小时。其实验流程视图如下:



5. 论文请于 8 月 24 日晚上 8 点之前以 PDF 格式提交到邮箱: [qjunxie@hdu.edu.cn](mailto:qjunxie@hdu.edu.cn),

邮件主题名 (同文件名) 格式为: 队号+模型 3(研究生组)+队员姓名