

2024年第九届数维杯大学生数学建模挑战赛题目
(请先阅读“数维杯大学生数学建模挑战赛论文格式规范”)

B 题 生物质和煤共热解问题的研究

随着全球能源需求的不断增长和对可再生能源的追求,生物质和煤共热解作为一种潜在的能源转化技术备受关注。生物质是指可再生能源,源自植物和动物的有机物质,而煤则是一种化石燃料。在共热解过程中,生物质和煤在高温和缺氧条件下一起热解,产生气体、液体和固体产物,其中液体产物被称为热解油或生物油。研究生物质和煤共热解油的产率和品质机理对提高能源利用效率、促进资源综合利用和确保能源安全具有重要意义。

一化工实验室选取棉杆(CS)、稻壳(RH)、木屑(SD)、小球藻(GA)等多种生物质和淮南煤(HN)、神木煤(SM)、黑山煤(HS)、内蒙褐煤(NM)等中低阶煤为共热解原料,并利用管式干馏炉在温和热解条件下研究不同种类和配比原料的共热解对产物分布的影响。在实验室研究中,微晶纤维素通常被用作一种模型化合物,以代表生物质中的主要纤维素成分,用来分析生物质热解产物的特性和化学反应机理。为进一步研究共热解产物生成机理,该实验室引入微晶纤维素作为模型化合物,分析比较棉杆(CS)热解、神木煤(SM)热解、棉杆/神木煤(CS/SM)共热解和微晶纤维素/神木煤共热解产生的正己烷可溶物(HEX)组分变化。共热解实验以 5/100, 10/100, 20/100, 30/100, 50/100 为混合比例进行固定热解实验。实验结果如附件 1 和附件 2 所示,名词解释见附录。

通过对比不同原料单独热解和共热解的产物组成,分析生物质与

煤的协同效应，揭示共热解过程中可能存在的协同效应和相互转化的机制，为深入理解共热解过程提供理论依据和实验数据支持。如果能够建立数学模型对共热解产物预测和优化，将有助于提高生物质与煤共热解过程的效率和产物利用率，同时减少环境污染和资源浪费。请通过数学建模完成下列问题：

（1）基于附件一，请分析正己烷不溶物(INS)对热解产率（主要考虑焦油产率、水产率、焦渣产率）是否产生显著影响？并利用图像加以解释。

（2）热解实验中，正己烷不溶物(INS)和混合比例是否存在交互效应，对热解产物产量产生重要影响？若存在交互效应，在哪些具体的热解产物上样品重量和混合比例的交互效应最为明显？

（3）根据附件一，基于共热解产物的特性和组成，请建立模型优化共解热混合比例，以提高产物利用率和能源转化效率。

（4）根据附件二，请分析每种共热解组合的产物收率实验值与理论计算值是否存在显著性差异？若存在差异，请通过对不同共热解组合的数据进行子组分析，确定实验值与理论计算值之间的差异在哪些混合比例上体现？

（5）基于实验数据，请建立相应的模型，对热解产物产率进行预测。

附件

附件一：热解数据统计.xlsx

附件二：热解产物产率计算结果.xlsx

附录

单独热解的煤和生物质：淮南煤(HN)、神木煤(SM)、黑山煤(HS)、内蒙褐煤(NM)、棉杆(CS)、木屑(SD)、小球藻(GA)、稻壳(RH)。

共热解组合：棉杆/淮南煤(CS/HN)、棉杆/神木煤(CS/SM)、棉杆/黑山煤(CS/HS)、木屑/黑山煤(SD/HS)、木屑/神木煤(SD/SM)、小球藻/淮南煤(GA/HN)、小球藻/内蒙褐煤(GA/NM)、小球藻/神木煤(GA/SM)、稻壳/淮南煤(RH/HN)、稻壳/神木煤(RH/SM)。

热解产物：焦油(Tar)、正己烷可溶物(HEX)、水(Water)、焦渣(Char)。

设生物质与煤的热解混合比例为 x/y ，根据经验以及相关文献，定义如下函数

$$f(x, y, \theta(x, y)) = \frac{x}{x+y} \times \text{生物质热解的产物收率} + \frac{y}{x+y} \times \text{煤热解的产物收率} + \theta(x, y),$$

其中 $f(x, y, \theta(x, y))$ 表示在混合比例 x/y 下，生物质与煤共热解的实际产物收率。 $\theta(x, y)$ 是交叉项，表示生物质与煤共热解的交互作用，以及其他因素的影响等，其作用有可能是促进作用也可能是抑制作用。

“ $\frac{x}{x+y} \cdot \text{生物质热解的产物收率} + \frac{y}{x+y} \cdot \text{煤热解的产物收率}$ ”是相当于函数 $f(x, y, \theta(x, y))$ 线性近似部分，附件 2 中的理论计算值即是用这个线性近似部分计算的。

另外，焦油是共热解产物中主要关注的部分，提高产物产量主要指提高焦油产量，其他产物及成本不予考虑。煤热解得到的焦油通常含有较少的杂质，易于提炼和利用。相比之下，生物质热解得到的焦油含有较多的杂质，需要更复杂的处理工艺才能提炼出纯净的产品。生物质热解产生的焦油处理成本较高，对环境和资源消耗也有更大的影响。因此，进行共热解实验时，期望得到的产物焦油更偏向于煤焦油。或者说，科研人员更关注煤热解所产生的煤焦油。生物质和煤热解之后得到的焦油其质量等同于煤热解直接产生的焦油。本实验的目的，就是为了通过生物质和煤热解反应得到（比煤直接热解）更多的煤焦油。

所有热解实验的初始温度均为 600°C ，升温 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

赛题声明：赛题仅用于 2024 年第九届数维杯数学建模挑战赛参赛选手使用，未经数维杯竞赛组委会授权，严禁任何形式的篡改、编辑及其他用途，一经发现，应承担相关责任。