

2021 年 CIMC“西门子杯”中国智能制造挑战赛

智能制造工程设计与应用类赛项：流程行业自动化方向

反应器对象说明

一、工艺描述

某反应工艺过程如下图所示：

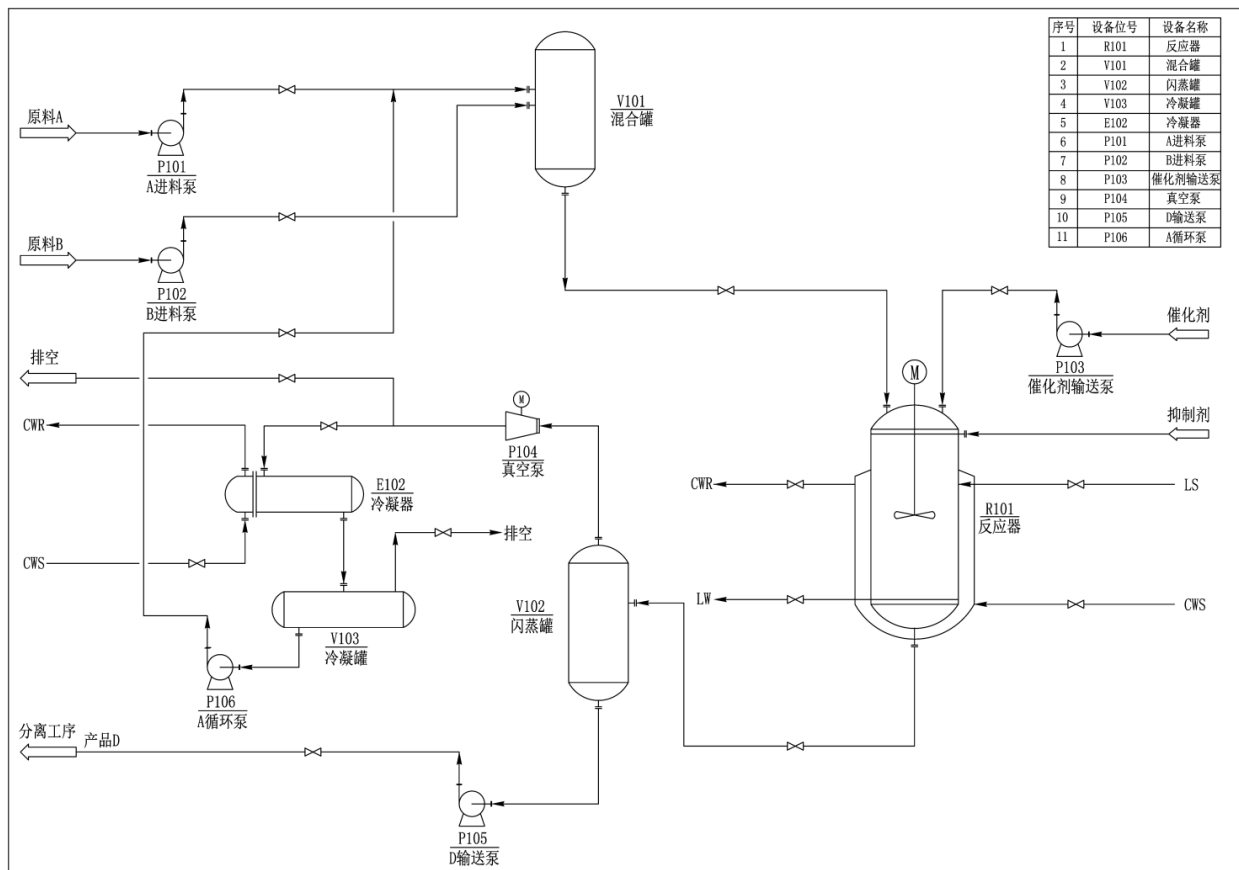
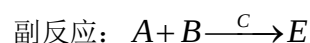
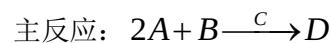


图 1 反应器工艺流程简图

该放热反应过程在催化剂 C 的作用下，原料 A 与原料 B 反应生成主产物 D 和副产物 E，反应方程式如下：



其中，主生成物 D 是所需产品，副生成物 E 是杂质，主、副反应均为强放热反应。为了获得较高的反应转化率，采用原料 A 过量的工艺。

原料 A 与原料 B 分别由原料 A 进料泵 P101、原料 B 进料泵 P102 输送进入混合罐 V101（立式罐）内混合，混合物料进入放热反应器 R101 进行反应，反应所需的催化剂 C，由催化剂 C 输送泵 P103 从反应器顶部加入。为了诱发反应达到活化温度（30℃），在反应初始阶段，反应器 R101 采用夹套蒸汽对反应物料进行加热。上述反应为强放热过程，反应器 R101 采用内盘管式水冷却，将反应放出的热量移除，维持反应器温度稳定，避免造成超温超压等安全事故。反应转化率与反应温度、停留时间、反应物料浓度及混合配比有关，反应体系气相压力对温度敏感，在冷却失效产生的高温条件下，过高的气相压力使反应器有爆炸的风险。在反应器顶部设置一路抑制剂，当反应温度或压力过高危及安全时，通入抑制剂 F，使催化剂 C 迅速中毒失活，从而中止反应。

反应器 R101 底部出口生成物含有产品 D、杂质 E，催化剂 C、未反应的原料 A 和少量原料 B，为了回收原料 A，在反应器下游设置闪蒸罐 V102，将混合生成物（D+E+C+A+B）中过量的原料 A 分离提纯。闪蒸罐 V102 顶部采出混合物（原料 A、少量 D+E+C+B）为气相，首先进入冷凝器 E102 与冷却水进行换热冷凝，冷凝后的混合物进入冷凝罐 V103，通过循环泵 P106 再送入混合罐 V101 循环利用。闪蒸罐 V102 底部的混合生成物（D+E+C+A+B）经输送泵 P105 加压，送到下游分离工序，进行提纯精制，以分离出产品 D。

反应生产装置提供最大负荷：原料 A 最大流量为 32.292t/h；原料 B 最大流量为 12.384t/h；催化剂 C 最大流量为 4.176t/h；装置最大产能：产品 D 最大产量为 47.35t/h。

（1）工艺参数

表 1-工艺参数表

工艺参数表			
序号	工艺说明	单位	工艺参数
1	混合罐 V101 液位	%	30~60
2	反应器 R101 液位	%	30~60
3	闪蒸罐 V102 液位	%	30~60
4	冷凝罐 V103 液位	%	30~60
5	反应器 R101 温度	℃	80~160
6	闪蒸罐 V102 温度	℃	20~160
7	冷凝罐 V103 温度	℃	20~50
8	反应器 R101 压力	kPa	100~150
9	闪蒸罐 V102 压力	kPa	20~150
10	产品混合物 D 含量	%	≥80

(2) 设备数据

表 2-设备数据表

设备数据表			
序号	位号	名称	设备参数
1	R101	反应器	型式：立式、夹套；内径：1m，高度：3m； 操作介质：A、B、C、D、E； 设计压力：200kPa，设计温度：200℃；
2	V101	混合罐	型式：立式；内径：0.6m，高度：3m；操作介质：A、B； 设计压力：120kPa，设计温度：100℃；
3	V102	闪蒸罐	型式：立式；内径 0.8m，高度：3m； 操作介质：A、B、C、D、E； 设计压力（最高/最低）：150kPa/20kPa；设计温度：200℃；
4	V103	冷凝罐	型式：卧式；内径：0.5m，长度：2m； 操作介质：A、少量 B+C+D+E； 设计压力：150kPa，设计温度：150℃；
5	E102	冷凝器	型式：列管式、卧式； 内径：0.4，长度：3m，换热面积：100m ² ； 操作介质：管程：A、少量 B+C+D+E，壳程：循环冷却水； 设计压力：管程：150kPa，壳程：250kPa； 设计温度：管程：150℃，壳程：100℃；
6	P101	A 输送泵	操作介质：原料 A；扬程：30m； 出口压力：313kPa；操作温度：20～50℃；
7	P102	B 输送泵	操作介质：原料 B；扬程：25m； 出口压力：307kPa；操作温度：20～50℃；
8	P103	C 输送泵	操作介质：催化剂 C；扬程：20m； 出口压力：293kPa；操作温度：20～℃；
9	P104	真空泵	操作介质：A、少量 B+C+D+E；抽气量：5000m ³ /h；

10	P105	D 输送泵	操作介质：产品 D 混合物；扬程：20m； 出口压力：227kPa；操作温度：70~75℃；
----	------	-------	---

(3) 物性数据

物性数据表					
序号	名称	分子量 g/mol	密度 kg/m ³	沸点℃	汽化潜热 J/mol
1	A	36	720	105	7513
2	B	24	840	120	14369
3	C	72	980	125	10817
4	D	96	910	130	15356
5	E	60	880	135	12608
6	F	108	720	132	34562
7	H ₂ O	18	1000	100	44848

二、反应器稳态特性

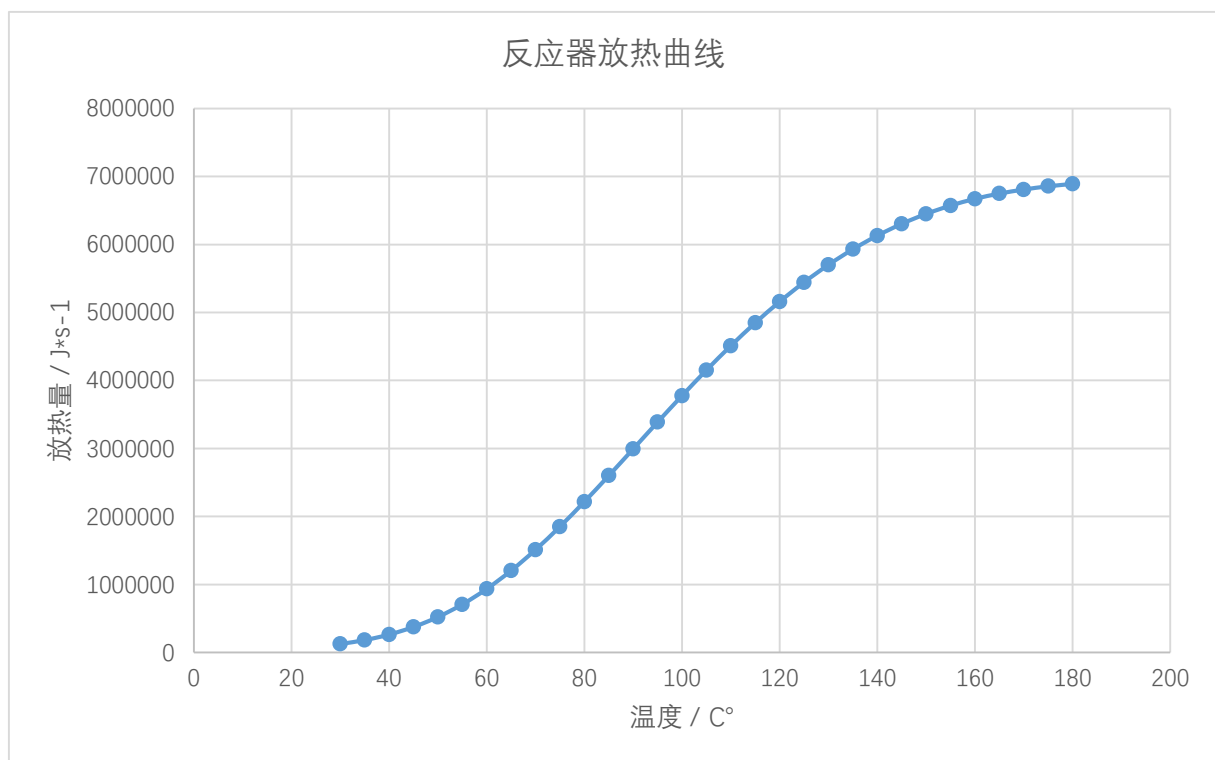
依据上一章节的反应器工艺描述，我们需要关注：

- 1) 如何优化反应器的进料量、进料配比、反应温度、反应器液位，使反应器出口物料中组分 D 的质量分数达标，且越高越好。
- 2) 保证反应器安全稳定生产。物料初始温度是 20°C ，需要进加热蒸汽使物料尽快到达合适的反应温度。同时，反应器内的化学反应是强放热反应，需及时关闭加热蒸汽，并调控冷却水进水流量，使反应器内温度稳定，避免由于温度过高导致物料汽化，发生反应器爆炸事故。
- 3) 此外，开车阶段需注意控制反应器内轻组分（组分 A）的含量，否则有可能在尚未达到设定的反应温度时，就出现物料汽化的现象，

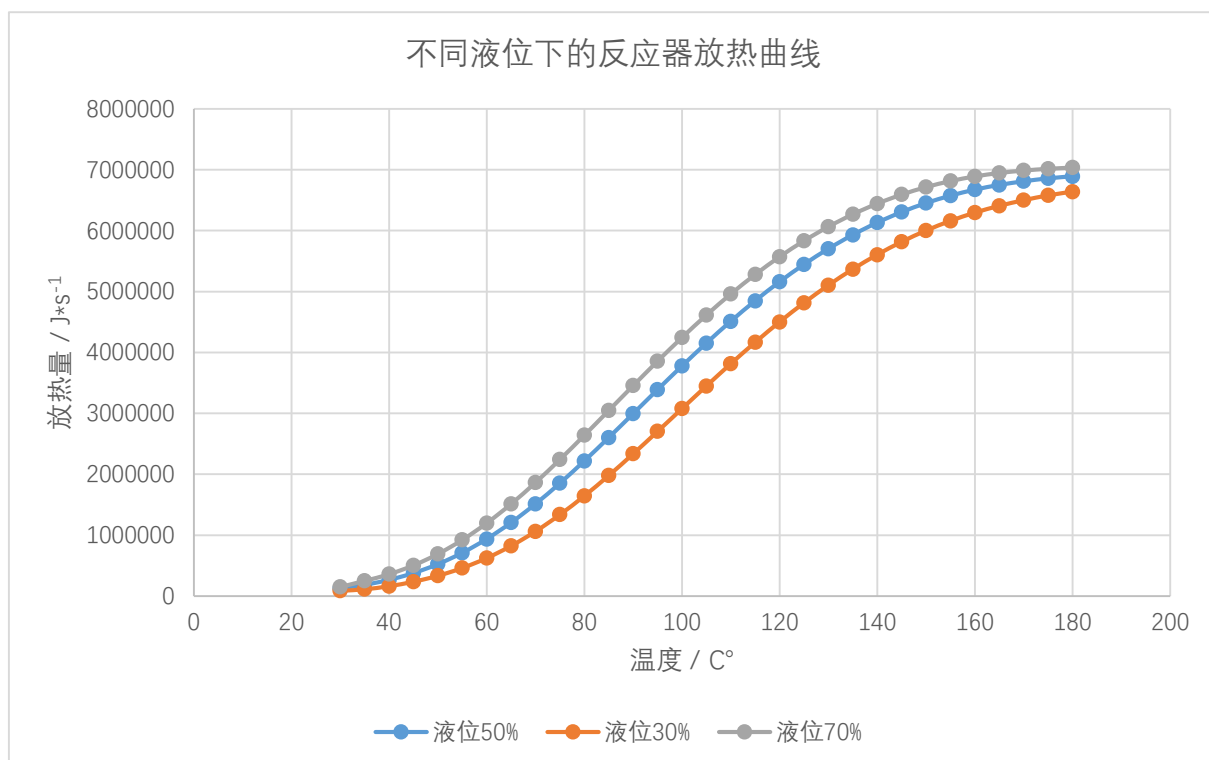
为了更高效地解决以上问题，下面给出不同反应条件下的反应器放热曲线、反应器出口处组分 D 质量分数-温度曲线、反应器移热曲线，以供参考。

1. 反应器放热曲线（横轴-温度/ $^{\circ}\text{C}$ ，纵轴-放热量/ $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ ，横轴是将反应温度控制在该数据点维持不变，纵轴对应数值即是等到反应进行到稳态时，记录的该反应温度下的放热量。）

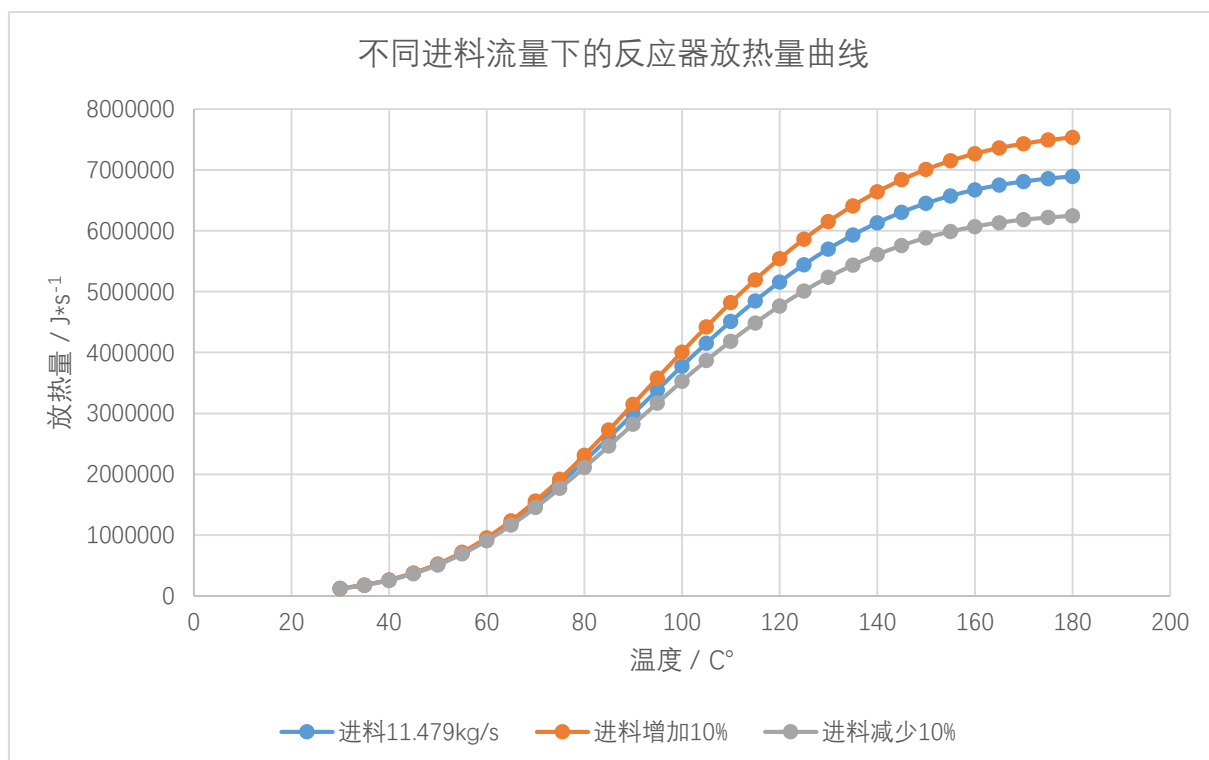
（1）反应条件：液位控制在 50%，A、B、C 物料流量比例和给料量控制在 9:3:1（ $\text{FA}=7.989\text{kg/s}$ $\text{FB}=2.65\text{kg/s}$ ， $\text{FC}=0.883\text{kg/s}$ ）。



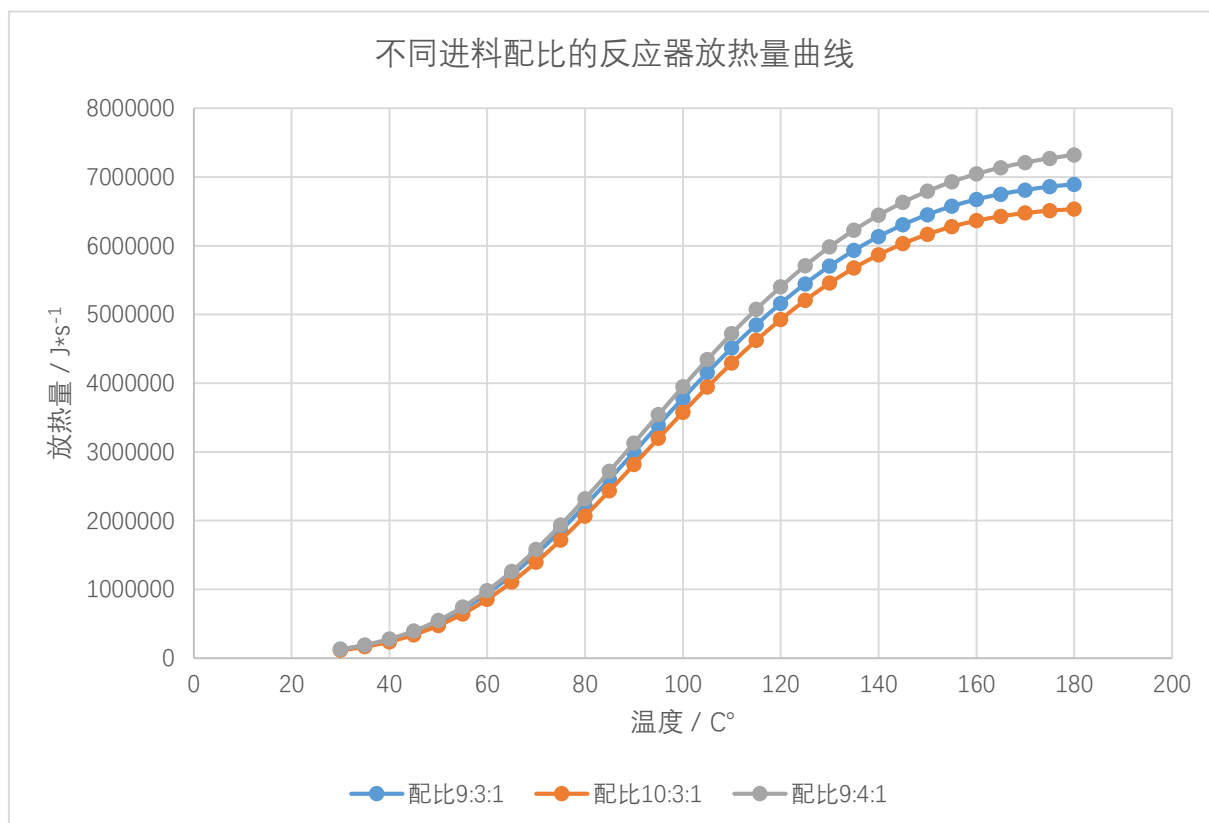
(2) 反应条件：液位分别控制在 50%、30%、70%，A、B、C 物料流量比例和给料量控制在 9:3:1 (FA=7.989kg/s FB=2.65kg/s, FC=0.883kg/s)。



(3) 反应条件：液位控制在 50%，A、B、C 物料流量比例控制在 9:3:1，总流量分别控制在 11.479kg/s、增加 10%、减少 10%。

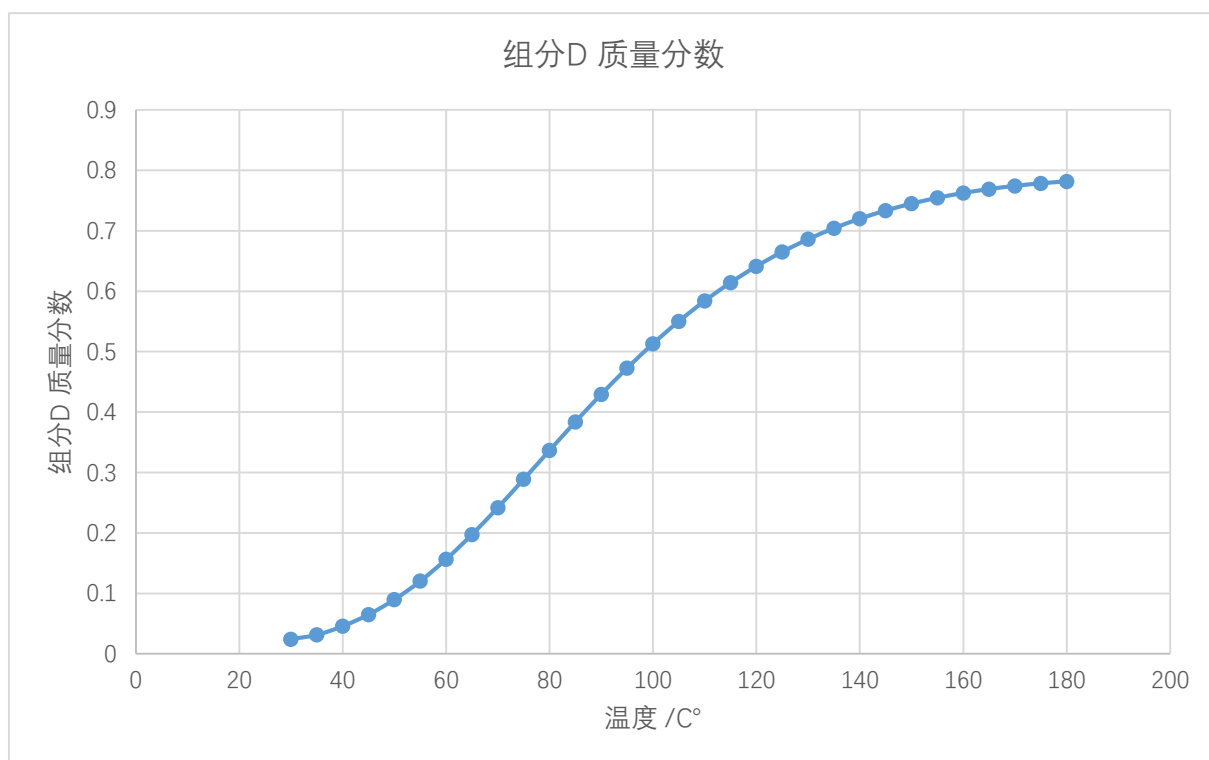


(4) 改变物料配比时的反应温度-放热量曲线（总流量不变）

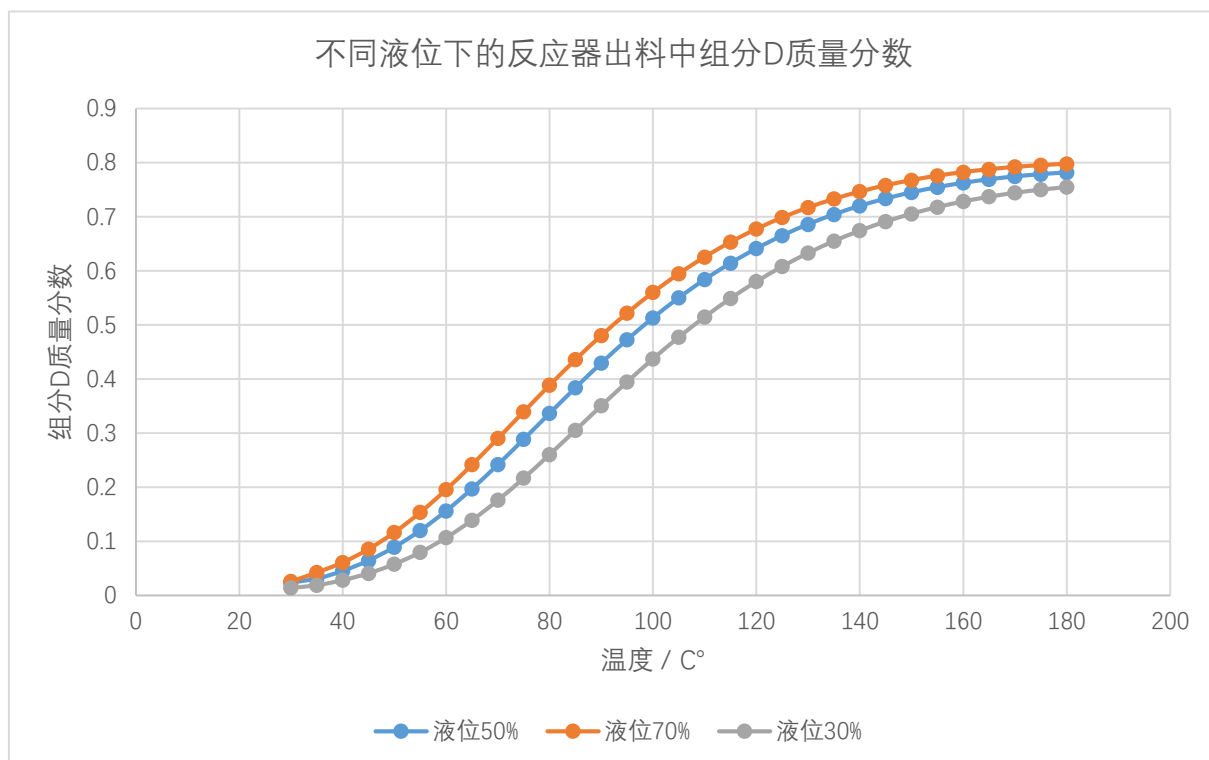


2. 反应器出口处（不是闪蒸！）的组分 D 质量分数-温度曲线（横轴-温度/°C，纵轴-组分 D 质量分数）

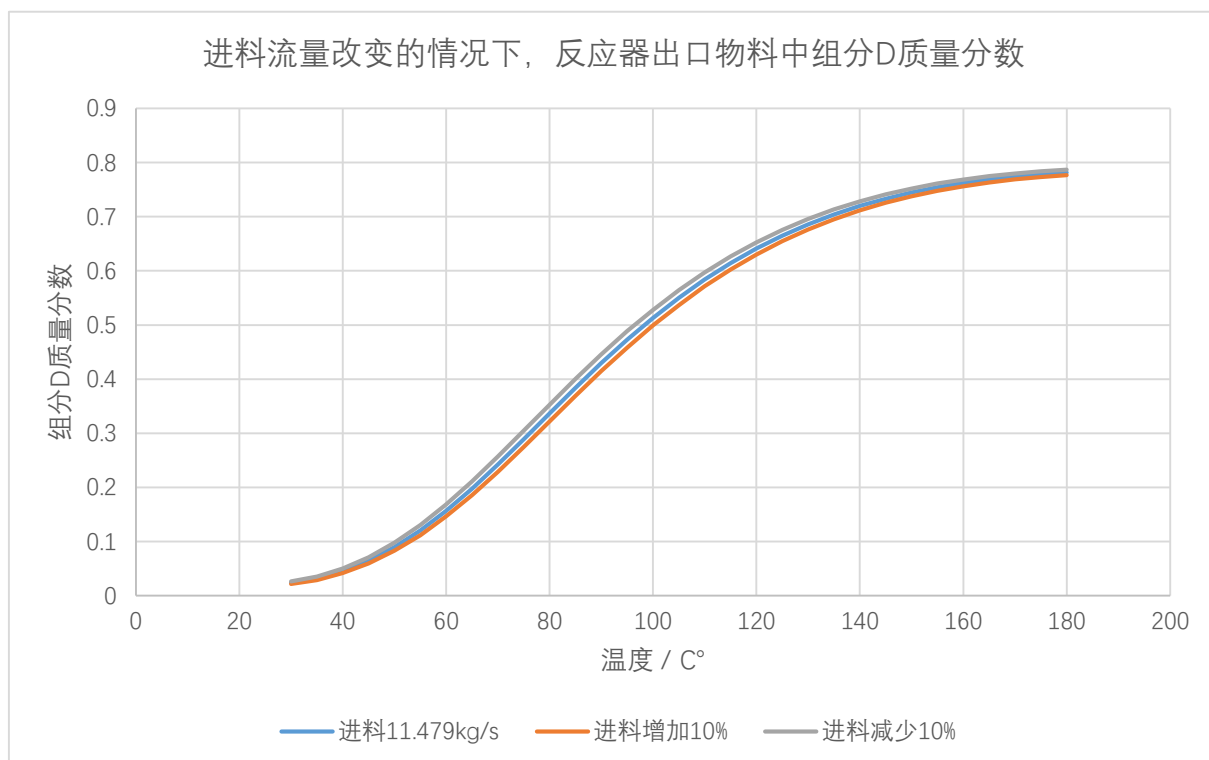
(1) 反应条件：液位控制在 50%，A、B、C 物料流量比例和给料量控制在 9:3:1（FA=7.989kg/s FB=2.65kg/s，FC=0.883kg/s）。



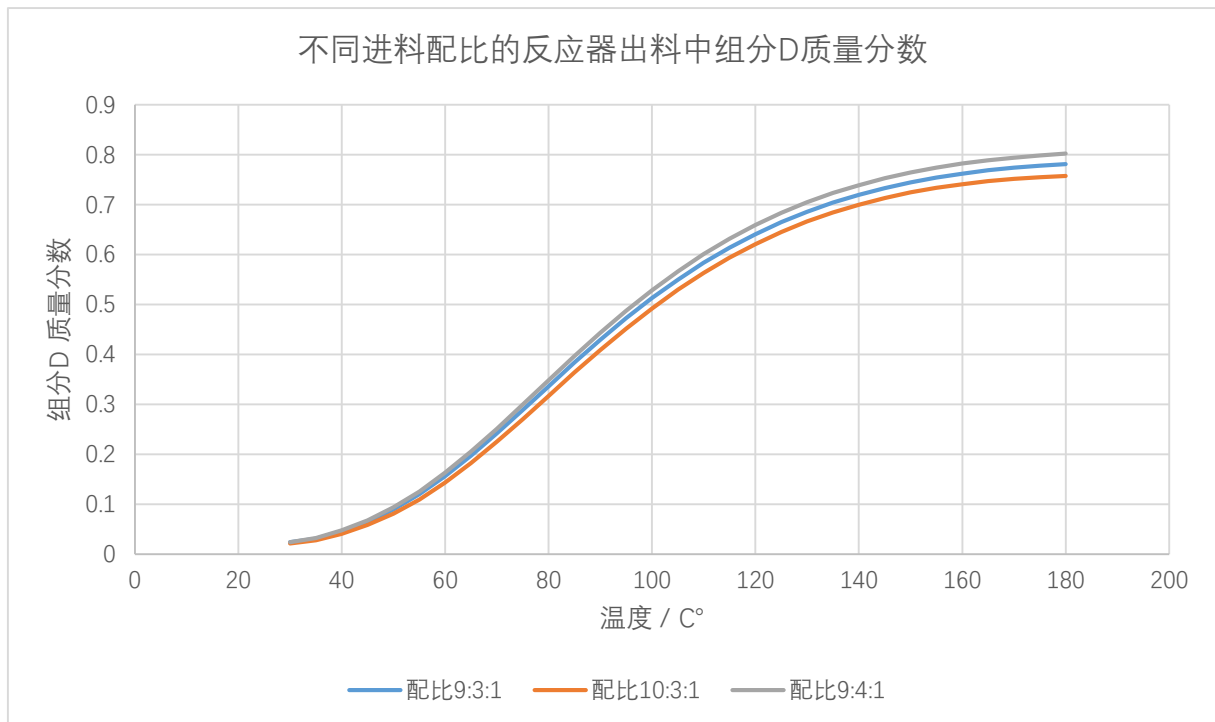
(2) 反应条件：液位分别控制在 50%、30%、70%，A、B、C 物料流量比例和给料量控制在 9:3:1 (FA=7.989kg/s FB=2.65kg/s, FC=0.883kg/s)。



(3) 反应条件：液位控制在 50%，A、B、C 物料流量比例控制在 9:3:1，总流量分别控制在 11.479kg/s、增加 10%、减少 10%。



(4) 改变物料配比时，反应器出料中组分 D 质量分数的曲线（总流量不变）

3. 放热/移热-温度曲线（横轴-温度/ $^{\circ}\text{C}$ ，纵轴-放热量/移热量 $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ ）

如下图所示，横轴是将反应温度控制在该数据点不变，纵轴即是在该温度下反应进行到稳态时，反应器内由于化学反应产生的放热量（蓝色线条），反应物料和冷却水由于热交换产生的传热量+入口物料到达该反应温度所吸收的热量（橙色、灰色及黄色线条）。因此，在放热曲线和移热曲线的交点处，反应器内物料温度能够维持不变。

