

# 基于超高纯氦氙分离实验的规整填料传热传质研究及模拟优化

陆聪聪<sup>1</sup>, 王舟<sup>2,3</sup>, 巨永林<sup>1</sup>, 崔祥仪<sup>2,3</sup>, 李帅杰<sup>5,7</sup>, 姚舜宇<sup>4</sup>, 赵康康<sup>2</sup>, 王浩宇<sup>5</sup>, 刘江来<sup>2,3,5</sup>, 季向东<sup>6</sup>

1. 制冷与低温工程研究所, 上海交通大学, 上海, 中国
2. 李政道研究所, 上海交通大学, 上海, 中国
3. 巴黎高科卓越工程师学院, 上海交通大学, 上海, 中国
4. 物理与天文学院, 粒子天体物理与宇宙学重点实验室, 上海市粒子物理与宇宙学重点实验室, 上海交通大学, 上海, 中国
5. 物理系, 马里兰大学帕克分校, 马里兰, 美国
6. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都, 四川, 中国

## 摘要:

PandaX-II cryogenic distillation system utilizing the structured packing PACK-13C is developed and operated for the extraction of krypton from commercially available xenon. Experimental results demonstrate the purified krypton concentration reached  $3 \times 10^{-12}$  mol/mol from  $3 \times 10^{-9}$  mol/mol during the distillation total reflux process. Based on the experimental model, a Computational Fluid Dynamics (CFD) model incorporating multi-physics coupling is constructed to simulate the gas-liquid separation process the structured packing, and the mass transfer coefficient is calculated based on the Delft model. Results indicate that the perforations with appropriate size on the surface of the structured packing could significantly enhance gas-liquid mass transfer. The peak height and wavelength of the packing are inversely correlated with purification efficiency, in which the effect of the peak height is more obvious.

**关键词:** 规整填料; 气液分离; 传热传质; 低温精馏

## 引言

由于大光产额、高密度、自屏蔽效应和长寿命放射性同位素等特点, 氙被用于暗物质探测实验中的探测介质[1-4]。目前商业高纯度氙产自于空分[5], 会不可避免引入放射性杂质<sup>85</sup>Kr, 衰变过程会释放出最大为 687keV 的  $\beta$  能量, 半衰期为 10.76 年[6], 会对暗物质探测实验引入本底。目前已为中国暗物质探测器研发超高纯氦氙低温精馏系统, 可有效将氦氙分离将<sup>85</sup>Kr 含量降至  $10^{-23}$  mol/mol 以下, 即氙中氦的含量降至  $10^{-12}$  mol/mol 以下[7], 满足大提纯速率和超高纯度。

目前世界上已研制用于暗物质探测器且投入运行的超高纯氦氙分离低温精馏系统基于 McCable-Thiele 方法设计, 浓度最低可达  $10^{-14}$  mol/mol, 即 0.01ppt。K.Abe 等[1]基于“DX 实验室填料”(Sulzer), 塔总高 208cm, 可以 0.6kg/h 的速率将含氦  $3 \times 10^{-9}$  mol/mol 的原料氙气提纯至  $3.3 \pm 1.0$  ppt, 后期将塔高升级至 291.5cm, 可以 4.7kg/h 的速率提纯得到至多 2.7ppt 的含氦高纯氙。PandaX 合作组[8]基于双层不锈钢金属丝网波纹填料 PACK-13C(上海化工研究院), 塔总高 400cm, 可以 5.0kg/h 的速率将含氦  $3 \times 10^{-9}$  mol/mol 的原料氙气提纯至  $1.2 \pm 0.3$  ppt, 后期将塔高升级至 600cm, 可以 10.0kg/h 的速率提纯至多 0.01ppt 的含氦高纯氙。Xenon 合作组[9]基于“EX 实验室填料”

(Sulzer), 塔总高 550cm, 可以最大 7.2kg/h 的速率提纯得到含氦至多 0.048ppt 的超高纯氙。以上精馏系统均采用规整填料。低温精馏分离能力极大依赖于其填料的性能, 因此研究极低浓度下填料表面上的分离过程, 对于促进极低浓度低温精馏系统的优化发展具有重要意义。

目前, 由于低温工况下规整填料测试实验成本高、难度大, 大多采用数值模拟的方法对填料的传热传质性能进行研究。刘宁馨等[10]发现波纹填料上开孔会增大气液两相相互作用, 有利于传质传热。田叶盛等[11]发现丝网波纹填料使液膜更容易在填料表面形成连续降膜流动, 显著增强传质推动力。李超等[12]发现波纹板的结构对液膜流动有重要影响。扈诗语等[13]发现高褶皱角有助于液体形成稳定的液膜, 可以减小压降和促进传质。但目前大多研究皆针对较高浓度下的精馏分离, 尚未有对 ppt 级别精馏分离的数值模拟模型, 结合实验数据研究极低浓度下规整填料上的传热传质情况对于以电子气为代表的超高纯工业气体的精馏分离工艺设计具有一定的指导作用。

对此, 本文将基于自主研发并已投入运行的氦氙分离低温精馏系统的实验数据, 在 COMSOL Multiphysics 软件中建立极低浓度下波纹填料 PACK-13C 的 REU 模型, 通过分析气液两相传热传质特性, 研究极低浓度下的气液传质过程, 并通过改变填料几何结构进行优化分析。文中第二部分介绍实验装置, 第三部分介

绍实验结果，第四部分介绍数值模型，第五部分介绍模拟结果及优化分析，最后在第六部分进行总结。

## 实验装置

基于 McCable-Thiele 方法，我们设计并研制了一套氦氙低温精馏系统[8]。精馏塔总高 5m，内部填料柱高度 4m，其中精馏端 1.9m，提馏段 2.1m，塔内径 80mm。精馏塔总体材质为 304 不锈钢，主要分为内外塔两层，内塔外侧包裹多层绝热纸以减少辐射漏热至约 6W。实验过程中，内外塔之间真空度可保持在至少 6mPa，能有效防止热对流和热传导。



图 1 精馏塔实物图

塔顶部为带 GM 制冷机的冷凝室，其底部呈漏斗形，便于液化的液氙回流至塔中。GM 制冷机冷头底部焊接紫铜扩展翅片以增大换热面积，提高换热效率，与加热棒配合可实现温度控制。除此之外，紫铜扩展翅片贴有加热片以控制温度。塔底部为再沸器，安装有电容式液位计以实时测量液位，再沸器中安装电加热棒用于蒸发液氙。在精馏塔顶部、中部和底部均安装了液体分配锥，能便在整个高度内的填料都得到均匀喷淋，减少壁流效应，提高精馏塔的效率。

填料是精馏塔中最关键的部分，由于重力作用，液体会附着填料表面呈液膜下滑，与上升的气体逆向接触进行传质传热作用，其性能直接影响精馏塔的提纯效率。在本文中，填料采用由上海化工研究院自主研发的双层不锈钢金属丝网波纹填料 PACK-13C[14]，适用于理论板数较高的精密精馏过程，比表面积高达  $1135\text{m}^2/\text{m}^3$ ，单位理论板压降仅为 29Pa。

## 实验结果

精馏塔运行主要包括预冷、进料、全回流、精馏提纯和停机回收五个阶段。其中预冷和进料阶段是为了将精馏塔内部含氦  $3 \times 10^{-9}\text{mol/mol}$  的原料氙气降温至工作温度

179.5K，并使再沸器中积累液氙，维持对应的饱和蒸汽压强 215kPa。全回流阶段在精馏塔运行过程中具有极其重要意义，在该阶段中全塔无进料和出料，塔顶制冷量与塔底加热量相等，气液两相间传质推动力最大，可以在最短的时间内使精馏塔进入传质平衡状态。在全回流阶段平衡后，塔底产品氙的纯度决定了提纯阶段产品的纯度[15]，可以测定精馏塔的分选提纯效率。

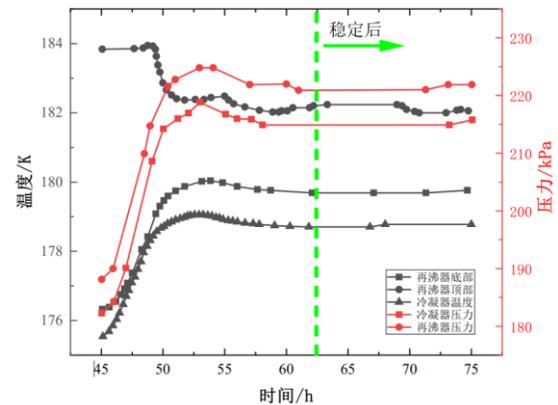


图 2 全回流阶段的温度和压力随时间的变化

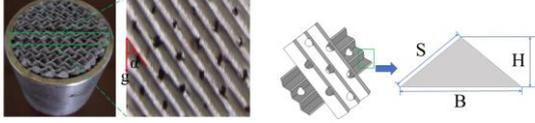
全回流阶段在 62.5h 后进入平衡状态，塔底再沸器中液位基本保持在 12.75cm，再沸器和冷凝器的温度压力如图 2 所示，冷凝器的温度为 179K，再沸器底部温度为 179.8K，再沸器压力约为 221kPa，为氙气在 179.8K 下对应的饱和压力，高于塔底约 6kPa，为氙气提供了足够的上升压差。经取样测量，塔底氙含氦浓度为  $3.0 \times 10^{-12}\text{mol/mol}$ ，塔顶氙含氦浓度为  $3.0 \times 10^{-7}\text{mol/mol}$ 。

全回流阶段平衡后，原料氙从精馏塔中部进入，从塔底引出产品氙，从塔顶引出氙富集的废品氙至液氮杜瓦中的氙气瓶保存，进入提纯阶段。在该阶段，取样部分塔底引出的产品氙，借助基于主要由液氮富集冷阱及已标定的残余气体分析仪组成得氦测量系统，测定产品氙中的氦浓度为  $(1.2 \pm 0.3) \times 10^{-12}\text{mol/mol}$ [8]。

## 数值模型

### 物理模型和边界条件

为研究填料层内极低浓度的氦 ( $< 10^{-7}\text{mol/mol}$ ) 与氙间的传热传质，本文截取实验所用的双层不锈钢金属丝网波纹填料 PACK-13C 的进行建模，其物理模型如 3b 所示，单片填料长度约为 20cm，关键参数如 1 所示。研究模拟位于冷凝器下方的首块填料，选取气液两相氦氙混合物作为流体物系，其中氦浓度为  $10^{-7}$  量级，其物理性质由 Peng-Robison(twu) 方程进行描述，其中二元相互作用参数 kPR 为 0.0019[16]。



(a) 几何结构 (b) 物理模型  
图 3 丝网波纹填料 PACK-13C 几何结构

表 1 丝网波纹填料 PACK-13C 几何结构

| 参数名称        | 大小      |
|-------------|---------|
| 峰高 H/mm     | 2.5     |
| 波距 B/mm     | 4       |
| 丝网厚度/mm     | 0.4     |
| 开孔直径/mm     | 2       |
| 孔隙率         | 0.65992 |
| 倾角 $^\circ$ | 45      |

在全回流工况下，精馏塔底部再沸器利用加热棒不断蒸发液氙，经规整填料升至塔顶冷凝器时遇到制冷机冷头被液化，由于重力的作用经规整填料掉入再沸器，自此在精馏塔中形成气液两相循环。其中，液相主要是以液膜形式黏着于规整填料的金属丝网之上，气相流动主要是在规整填料所形成的三角形通道。为了更好模拟气液两相在填料中的流动状态，将气液两相接触面设置为内壁传热传质边界条件，将两者分离处于不同的流道中。

在规整填料上，气相流动方向为自下而上，液相流动方向则相反。因此，在模型中将气相流域下方设置为气相入口，液相流域上方设置为液相入口，除进出口和气液接触面以外其余边界设置为壁面绝热无通量边界，具体设置如表 2 所示。

### 控制方程

在全回流工况下，氙氙混合物气液两相雷诺数分别为 9.6 和 1.8，均处于层流状态。

$$Re = \frac{\rho u l}{\mu}$$

其中气液相特征长度取为对应的水力直径，m； $\rho$  为流体密度，其中液相密度为 2853.9kg/m<sup>3</sup>，气相密度为 18.792kg/m<sup>3</sup>； $u$  是气液的表现速度，由制冷量得到冷凝器中冷凝的液相流量，再除其流道横截面积即可得到表现速度，气相为 2.962×10<sup>-3</sup>m/s，液相为 1.0064×10<sup>-4</sup>m/s； $\mu$  为气液相动力粘度，气相为 1.624×10<sup>-5</sup>Pa·s，液相为 4.11×10<sup>-4</sup>Pa·s。

流场控制方程主要包括连续性方程和动量方程：

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F + \rho g$$

式中： $F$  是流体体积力源项矢量，kg/(m·s)； $g$  是重力加速度矢量，取为 9.80m/s<sup>2</sup>。液相主要以液膜形式附着于金属丝网上，液体流域厚度近似为丝网厚度，即 0.4mm。为了反映金属丝网结构对于液体流动的影响，将液体流域设置为孔隙率 0.65992、渗透率 2.757×10<sup>-10</sup>m<sup>2</sup> 的多孔介质。

浓度场利用多孔介质中的稀物质传递描述。在稀物质传递过程中，由扩散引起的通量符合菲克第一定律，这一物理量只取决于溶质和溶剂相互作用的单一性质，即扩散系数，其控制方程为：

$$\nabla \cdot J_i + u \cdot \nabla c_i = R_i$$

$$J_i = -D_{i,eff} \nabla c_i$$

$$D_{i,eff} = \frac{\varepsilon}{\tau} D_i$$

其中， $c_i$  是物质  $i$  的浓度，mol/m<sup>3</sup>； $R_i$  是物质  $i$  的摩尔通量，mol/m<sup>2</sup>； $D_{i,eff}$  是有效扩散系数， $D_i$  是实际扩散系数，m<sup>2</sup>/s； $\varepsilon$  是孔隙率， $\tau$  是迂曲度。

对于多孔介质而言，有效扩散界面小于自由流体的界面，实际浓度梯度小于表观浓度梯度，所以有效扩散系数不同于实际扩散系数。因此，引入了迂曲度来描述这一效应。迂曲度与孔隙率之间存在标准相关性，根据 Millington-Quick 方程描述：

$$\tau = \varepsilon^{-\frac{1}{3}}$$

气体扩散系数采用 Fuller-Schettler-Giddings 方程描述，液体扩散系数采用 Wesselingh-Krishna 方程描述。方程输入为温度、压力和浓度，耦合物理场求解所需物性参数。气液接触面上由于浓度差异会发生传质作用，气液间质量传递系数由 Delft 模型[17]得出，该模型考虑了流动状态对于传质的影响，质量传递系数由下式得出：

$$\frac{0.15}{k_{LG}} = \frac{K}{k_L} + \frac{1}{k_G}$$

其中：

$$d_{hg} = \frac{\frac{(Bh - 2\delta S)^2}{BH}}{\left[ \left( \frac{BH - 2\delta S}{2H} \right)^2 + \left( \frac{BH - 2\delta S}{B} \right)^2 \right]^{0.5} + \frac{BH - 2\delta S}{2H}}$$

$$k_G = \frac{D_G}{d_{hg}} \sqrt{Sh_{G,lam}^2 + Sh_{G,turb}^2}$$

$$Sh_{G,lam} = 0.664 Sc_G^{1/3} \sqrt{Re_{Grv} \frac{d_h}{l_{G,pe}}}$$

$$Sh_{G,turb} = \frac{Re_{Grv} Sc_G \frac{\xi_{GL} \phi}{8}}{1 + 1.27 \sqrt{\frac{\xi_{GL} \phi}{8}} (Sc_G^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left( \frac{d_h}{l_{G,pe}} \right)^{2/3} \right]$$

$$k_L = 2 \sqrt{\frac{D_L u_L}{\pi 0.9 d_h}}$$

式中： $B, H, S$  是规整填料的结构参数，见表 1； $\delta$  是液膜厚度，近似为丝网厚度 0.4mm； $K$  是氙和氙的质量平衡常数，即 8.6805； $k_G$  是气相传质系数， $k_L$  是液相传质系数，m/s； $D_G$  是氙在气相氙中的扩散系数，4.64×10<sup>-6</sup>m<sup>2</sup>/s， $D_L$  是氙在液相氙中的扩散系数，4.40×10<sup>-9</sup>m<sup>2</sup>/s； $d_h$  是气相的水力直径，m； $Sh$  是对应状态下的舍伍德数， $Sc$  是对应状态下的施密特数， $\xi_{GL}$  是氙氙混合物气液摩擦系数。

温度场采用流体传热模型描述，包括了热传导和热对流两种传热方式，由于精馏内塔外包裹有 10 层多层绝热纸，整塔辐射漏热仅有 15W，所以忽略热辐射对于温度场的影响。考虑到金属丝网对于液相温度分布的影响，将液相流域设置为多孔介质。在实际精馏分离过程中，液体附着于金属丝网形成液膜，液膜表面与温度较高的气相接触相变，为重建平衡状态气液间产生传热传质。为了较好的描述该作用对于浓度场的影响，将气液界面上的传热量与传质量联立计算，即传热量=传质量×汽化潜热。

### 数值方法

采用稳态求解器的分离迭代求解算法，通过物理场数逐增耦合提高收敛性，针对流场、浓度场、温度场选用 GMRES 求解器。

### 网格无关性验证与模型可靠性

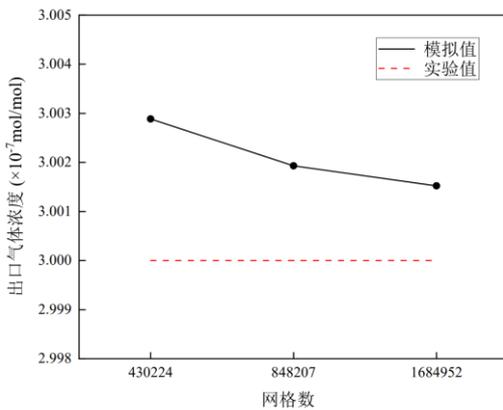


图 4 网格无关性验证

由于模型结构较为复杂，采用非结构化网格进行网格剖分，对于壁面和气液两相交错区域进行了网格加密，分别产生 430224、848207、1684952 的网格。气体出口含氮浓度如图所示，在数量为 848207 和 1684952 的网格下计算结果几乎无异，因此，为节约计算资源，网格数量被确定为 848207，网格平均质量为 0.6176。

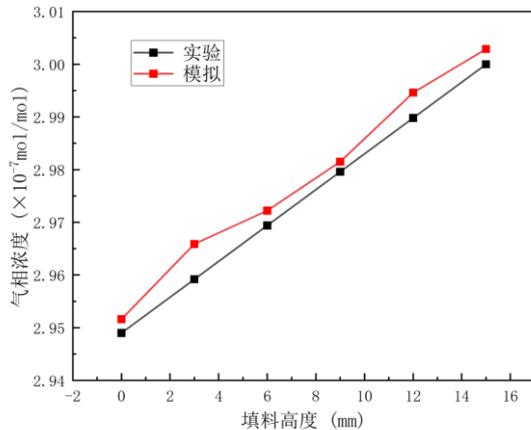


图 5 模型可靠性验证

为验证模型可靠性，以全回流工况中位于冷凝器下方的首块填料为模拟对象，假设每块精馏理论塔板中气液相浓度随塔板高度呈线性

分布，根据全回流实验工况下塔顶冷凝器取样得到的气相浓度实验数据[8]，得到填料上的气相浓度分布，如图 5 黑线所示。模拟结果（红线）与之相比，可见整体趋势一致，模拟结果显示的气相浓度整体偏高，平均误差为 0.12%，证明模型具有良好可靠性。

### 模拟结果分析

#### 填料上的速度、温度、浓度分布

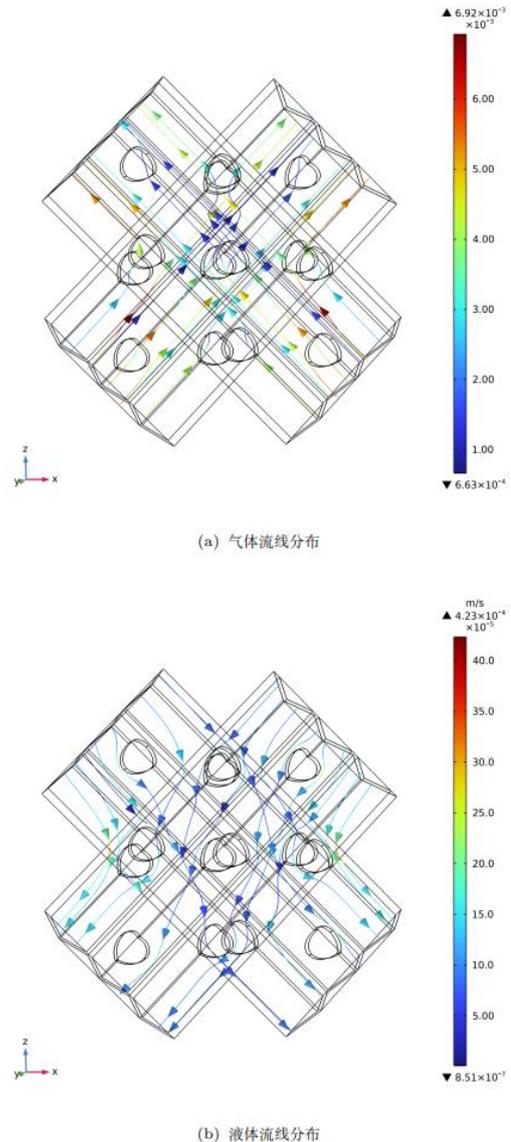


图 6 流线分布

图 6 为气相和液相的流线分布，总体上气体与液体呈逆向流动，气体由于压强差的作用向上流动，在特征单元内最高流速可达  $6.92 \times 10^{-3} \text{m/s}$ ，出现在交叉流道入口区域，丝网开孔附近区域上的流线比较混乱，处于丝网两边流道的气体可以交换流道，有利于该区域的气体混合。液体由于重力的作用在被设置于多孔介质的丝网中向下流动，模拟结果显示最高流速可达  $4.23 \times 10^{-4} \text{m/s}$ ，在相邻两片填料的接触区域，液体可以由原先的丝网进入另一片丝

网，使得交叉区域上的流线分布较为混乱，提高了液体的局部流速。

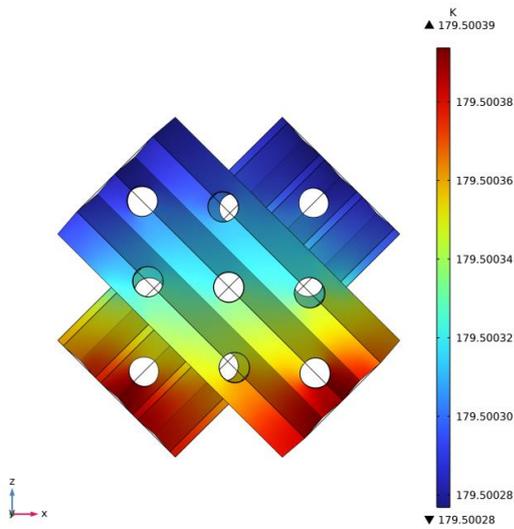
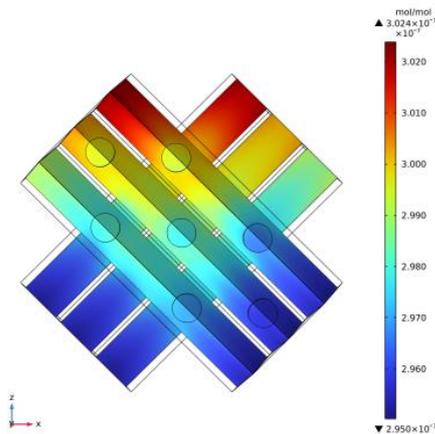
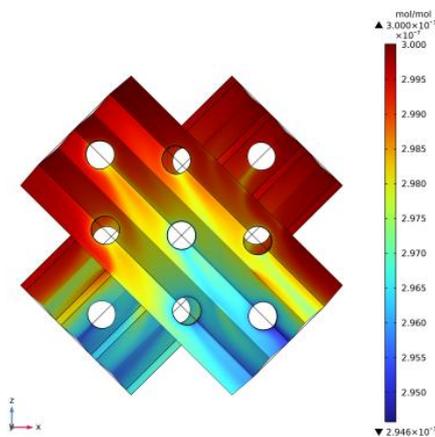


图7 液体温度分布

图7为液体温度的分布，顶部温度较低，底部温度较高，符合精馏塔的实际情况，但模拟的模拟单元高度仅约为15mm，相较于精馏塔2m的整体而言尺度较小，因此温度变化极小。



(a) 气体浓度分布



(b) 液体浓度分布

图8 气液相浓度分布

图8(b)为PACK-13C 填料上液体含氮浓度的分布情况，液体由重力作用往下流动，在经过20mm的填料后，由 $3.00 \times 10^{-7} \text{ mol/mol}$ 入口浓度下降至 $2.97 \times 10^{-7} \text{ mol/mol}$ 。在经过开孔区域时，会在孔后方形成一个明显低于周边浓度的尾流，表明开孔附近气液间传质作用得到了强化，主要是由两方面引起。第一方面是液相在流经开孔区域时，横截面面积减少，速度变化梯度较大，液体扰动更剧烈。流过开孔后，孔后方的液体需要由圆孔周围液体补充聚集，该作用使得在此区域流速较缓慢，气液间传质时间更长。第二方面是由于填料两边不同流道的气相能在圆孔处交叉混合，提高了气相的混合作用，气液接触更加充分。

除此之外，两个交叉填料间的接触部分也会形成尾流，但宽度相较于圆孔后方更短。其主要是由于填料交叉接触区域两块填料上的液体流动方向相互垂直，部分液体在会由原来的填料进入另一块填料，液体之间碰撞引起液相混合充分，增强了传质作用，但该强化作用较开孔带来的较弱，因此尾流宽度较。

图8(a)为气相交叉流道上的浓度分布情况，下方为气相入口，浓度为 $2.95 \times 10^{-7} \text{ mol/mol}$ ，上方为出口，浓度为 $3.00 \times 10^{-7} \text{ mol/mol}$ ，这是由于和逆向流动的液相在气液接触面上发生了传质作用，氮逐渐富集在气相。分子扩散理论中气相中分子扩散速度大于液相[18]，所以模拟结果显示气相总体浓度相较于液相而言分布更为均匀。

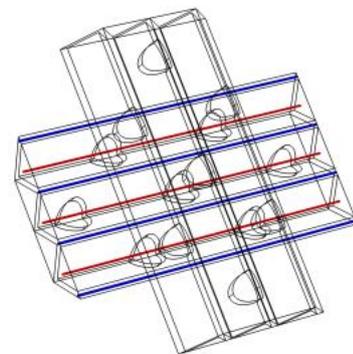


图9 气液截线分布位置

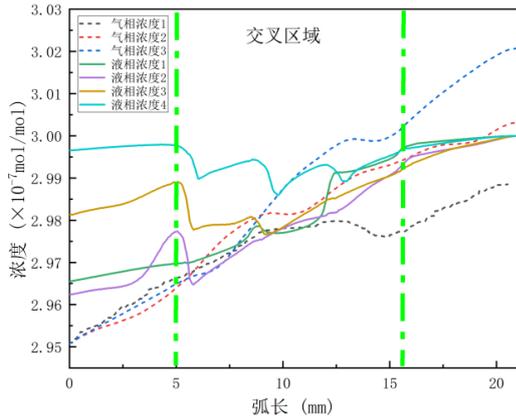


图 10 气液截线上的浓度变化

如图 9 所示，在三维模型中从上到下依次截取了三条气相截线(红色)和四条液相截线(蓝色)，方向为 z 轴偏 45 度，图 10 为截线上的浓度分布，其中实线为液相截线，虚线为气相截线，总体而言气液相浓度随着截线向上而升高，三个气相截线上，处于第一个即最下方的流道出口浓度较低，四个液相浓度中，第一个和第二个即下方两流道的液体出口浓度较低，符合精馏塔内实际情况。在绿色点虚线范围内为交叉流道区域，在该区域内液相截线浓度变化较大，出现了四个波动较大的峰谷，浓度上升是由于相邻丝网上不同浓度的液相混合导致，浓度下降较迅速区域位于开孔附近，该区域气液局部速度较高，传质作用强。

## 模拟结果分析

### 开孔直径对 PACK-13C 填料传质的影响

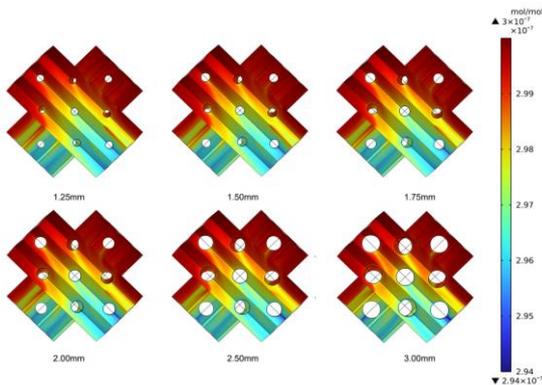


图 11 开孔直径对传质的影响

在不同的填料表面开孔直径下，图 11 展示了液相浓度的分布情况，图 12 是出口液体浓度的变化情况。模拟结果显示随着开孔直径变大，开孔后方浓度变化更为剧烈，尾部拖带宽度增加，但出口液体浓度不断升高，3mm 开孔下出口液体浓度为  $2.9715 \times 10^{-7} \text{ mol/mol}$ 。

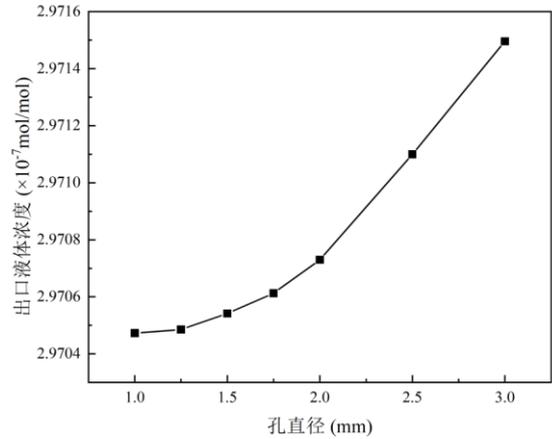


图 12 开孔直径对传质的影响

图 12 中，随着开孔直径的变大，出口液体浓度升高更为明显，1.0mm 和 1.25mm 开孔直径下，出口液体浓度几乎不变，说明合适的开孔直径对于传质有加强作用，模拟结构显示液体进入开孔区域时，截面积发生变化，其流动状态更不稳定，不同流道中的气相也会在开孔附近交叉混合，提高该局部位置上传质作用的效率，传质系数上升。但随着开孔直径的增大，填料表面丝网占据面积减少，其单位长度上气液接触面积减少，进一步影响了气液间的传质作用，从而导致出口液体浓度不断升高，图中开孔直径 1.75mm 之后随着开孔直径升高，出口液体浓度迅速升高，说明此时气液接触面积减少对于整体传质的负面效应更为突出。因此在设计丝网填料开孔时，应当综合考虑其对增强局部传质作用和减少气液相接触面积的双面效应。

### 丝网厚度对 PACK-13C 填料传质的影响

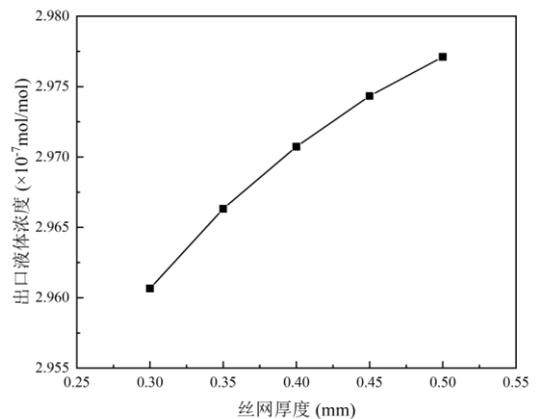
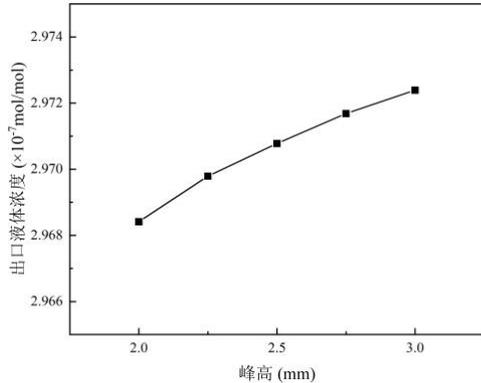


图 13 丝网厚度对传质的影响

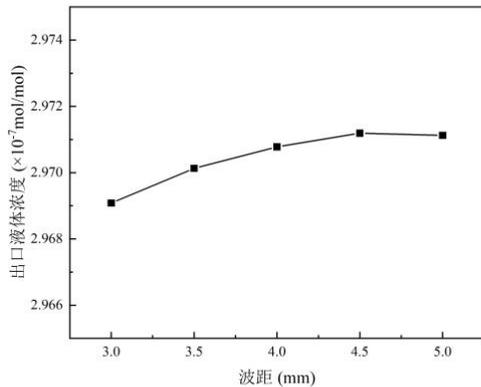
图 13 为丝网厚度对出口液体浓度的影响，丝网厚度越大，出口液体浓度越高，提纯效率越低。这是由于在模拟中将液膜厚度设置为丝网厚度，液体厚度增加，气液接触面上的液体浓度由于气液传质作用下降，但液体内部未与气体发生传质作用，液体会产生浓度梯度，进而引发浓度扩散，导致液体平均浓度偏高。因

此，形成较薄的液膜有利于提高提纯效率，但也会导致提纯速率的下降。

### 填料几何结构对 PACK-13C 填料传质的影响



(a) 峰高对于填料传质的影响



(b) 波距对于填料传质的影响

图 14 填料几何结构对于传质的影响

填料几何结构会影响气液两相的流道形状，导致气液流速的变化，进而影响传质作用。图 14 为波距和峰高对于传质的影响，可以看到出口液体浓度与峰高和波距皆为正相关，峰高和波距越大，出口液体浓度越高，提纯效率越低，而且峰高相较于波距对传质的影响更大，在 4.5mm 和 5.0mm 的波距下，出口液体浓度几乎不变。

### 结论

本研究基于自主设计研制且投入运行的氦氙分离低温精馏系统，得到了精馏塔在全回流工况运行下的温度、压强和浓度分布，在 COMSOL Multiphysics 软件中建立了基于开孔丝网规整填料 PACK-13C 几何 REU 模型，通过分析含氦  $10^{-7}$  mol/mol 量级下气液相的温度、速度和浓度分布，研究开孔直径、丝网厚度、波距和峰高对于填料传质性能的影响，得到结论如下：

(1) 采用开孔丝网规整填料 PACK-13C 的氦氙分离低温精馏系统在全回流工况下，再沸器底部温度 179.8K，压力 221kPa，冷凝器温度

179K，压力 215kPa，实现气液相的逆向循环，能将含氦浓度  $3 \times 10^{-9}$  mol/mol 的氙提纯至  $3 \times 10^{-12}$  mol/mol。REU 多物理场耦合模型模拟结果显示冷凝器下方的首块填料顶部出口气体含氦浓度为  $3.002 \times 10^{-7}$  mol/mol，与实验误差为 0.12%，具有良好的准确性。

(2) 丝网规整填料交叉处置堆叠形成的交叉气液相流道能有效提高混合效率，气液截线浓度在此区域变化剧烈，表明传质作用较强。丝网规整填料开孔会使其上的液膜在孔后方形成低浓度尾流，强化传质作用。但开孔较大导致气液接触面积减少，提纯效率反而会降低，开孔时需要综合考虑两因素，模拟显示 1.0mm 的开孔直径下提纯效率最高。

(3) 丝网厚度与提纯效率呈反相关，厚度增加会使液体形成浓度梯度，液膜内部无法与气相发生传质作用，导致液体出口平均浓度升高，但厚度过低会使提纯速率下降。

(4) 在单一变量下，峰高和波距与提纯效率呈反相关，其中峰高的影响更为剧烈，表明在三角形流道中，顶角较小，丝网波纹形状明显更有利于传质。

### 参考文献

- [1] K Abe, J Hosaka, T Iida, M Ikeda, K Kobayashi, Y Koshio, A Minamino, M Miura, S Moriyama, M Nakahata, et al. Distillation of liquid xenon to remove krypton. *Astroparticle Physics*, 31(4):290–296, 2009.
- [2] E Aprile and T Doke. Liquid xenon detectors for particle physics and astrophysics. *Reviews of Modern Physics*, 82(3):2053–2097, 2010.
- [3] Dmitry Akimov. Techniques and results for the direct detection of dark matter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 628(1):50–58, 2011.
- [4] Vitaly Chepel and Henrique Araújo. Liquid noble gas detectors for low energy particle physics. *Journal of Instrumentation*, 8(04):R04001, 2013.
- [5] Hiroyuki Sekiya, for the XMASS collaboration, et al. Xmass. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 308, page 012011. IOP Publishing, 2011.
- [6] Yasuo Takeuchi. Distillation purification of xenon for krypton and measurement of radon contamination in liquid xenon. *Proceedings of the XeSAT*, 2005.
- [7] 王舟, 张华, 巨永林, et al. 暗物质探测器的液氦低温精馏系统研制. *上海交通大学学报*, 47(08):1282–1286, 2013.
- [8] Z Wang, L Bao, XH Hao, YL Ju, K Pushkin, and M He. Large scale xenon purification using cryogenic distillation for dark matter detectors. *Journal of Instrumentation*, 9(11):P11024, 2014.
- [9] Elena Aprile, J Aalbers, F Agostini, M Alfonsi, FD Amaro, M Anthony, F Arneodo, P Barrow, L

Baudis, Boris Bauermeister, et al. Removing krypton from xenon by cryogenic distillation to the ppq level. *The European Physical Journal C*, 77:1–12, 2017.

[10] Ya-qiong Guo, Ning-xin Liu, Lai Cai, Wei-rong Hong, A Ya-qiong Guo, A Ning-xin Liu, A Lai Cai, and A Wei-rong Hong. Experimental and numerical investigations of film flow behaviors in resonance section over corrugated plates. *J. Zhejiang Univ.-Sci. A*, 20:148–162, 2019.

[11] 田叶盛, 李虎林, 姜永悦, 龙磊, 吉永, 蔡扬. 稳定同位素  $^{13}\text{C}$  分离用高效丝网波纹填料表面降膜流动研究. *同位素*, 29(2):108–115, 2016.

[12] 李洪涛阎维平, 叶学民. 液体薄膜流的流动和传热特性. *华北电力大学学报*, (01):59–65, 2005.

[13] 扈诗语, 植晓琴, 顾陈杰, 詹高铭, 滕艺璇, and 邱利民. 精馏规整填料表面水与液氮降膜流动特性对比研究. *低温工程*, (05):41–47, 2022.

[14] Hu-Lin Li, Yong-Lin Ju, Liang-Jun Li, and Da-Gang Xu. Separation of isotope  $^{13}\text{C}$  using high-performance structured packing. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49(3):255–261, 2010.

[15] C Judson King. *Separation processes*. Courier Corporation, 2013.

[16] Jorge CG Calado, Elaine Chang, and William B Streett. Vapour-liquid equilibrium in the krypton-xenon system. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 117(1):127–138, 1983.

[17] Z Olujic, M Behrens, L Colli, and A Paglianti. Predicting the efficiency of corrugated sheet structured packings with large specific surface area. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 18(2):89–96, 2004.

[18] R Byron Bird. Transport phenomena. *Appl. Mech. Rev.*, 55(1):R1–R4, 2002.