第22卷 第1期 空 间 科 学 学 报 Vol.22, No.1
2002 年 1月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 2002

空间连续流电泳电流体力学过程的地基模拟*

陶祖莱[1] 简来成[2] 李 涛[1] 高宇欣[1]

[1](中国科学院力学研究所 北京 100080)

[2](台北物理研究所)

摘 要

通过相似性分析得到了空间连续流电泳电流体力学过程地基模拟的相似性准则. 数值模拟表明, 所得相似性准则是有效 (近似) 的. 基于此, 建立了空间连续流电泳电流体力学过程地基模拟实验系统, 并进行了生物样品分离实验. 当然, 相似准则的最终检验有待于空间实验.

关键词 连续流电泳—电流体力学—相似性

1 引 言

生物制品分离是生物工程的一项关键技术, 目前尚未找到一种理想的高效率的分离方法. 空间飞行器所特有的微重力环境 (10^{-4}—$10^{-6}\,g$) 为生物制品的分离提纯开辟了新前景. 故美国、西欧、日本和俄罗斯等均对此十分重视, 投入大量人力、物力进行研究 [1,2]. 然而, 空间实验表明, 空间连续流电泳分离的效果往往因一些目前尚不可知的因素的作用, 起伏很大, 甚至导致失败. 因此, 美国国家微重力委员会等认为, 欲使空间连续流电泳分离技术达到实用地步, 必须弄清楚连续流电泳的电流体力学规律. 由于空间实验成本高贵, 连续流电泳电流体力学的研究, 必须采用如图 1 所示技术路线. 本研究的目的在于解决连续流电泳电流体力学的地基模拟问题.

2 相似性分析

电流体力学过程的相似性问题, 是空间连续流电泳地基模拟的基础. 取模型如图 2 所示.

系统内电流体力学过程受以下因素制约:

(1) 几何参数

l(电泳分离有效长度) 、 h(电泳室有效宽度) 、 d(电泳室前、后壁间距).

(2) 边界条件

* 国家 863 计划及国家自然科学基金资助项目
2001-03-02 收到原稿, 2001-08-09 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

T_0(介质进口温度)、U_0(进口流速)、P_0(进口压力)、C_0(进口浓度分布)、T_w(前、后壁温度)、E_0(电场强度).

(3) 物性参数

ρ(介质密度)、η(介质黏度)、σ(电导率)、λ(热传导系数)、β(热膨胀系数)、D(扩散系数)、C_p(等压热容量)、α(壁热交换系数)、q_e(被分离物表面等效电荷)、a_e(被分离物特征尺寸).

(4) 重力环境

g(从地面重力 g_0 到空间微重力 μg_0).

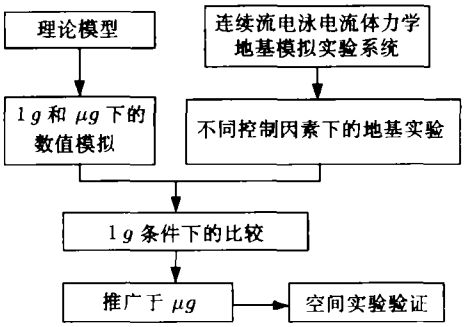


图 1　技术路线示意图

Fig.1　Schematic of technical route

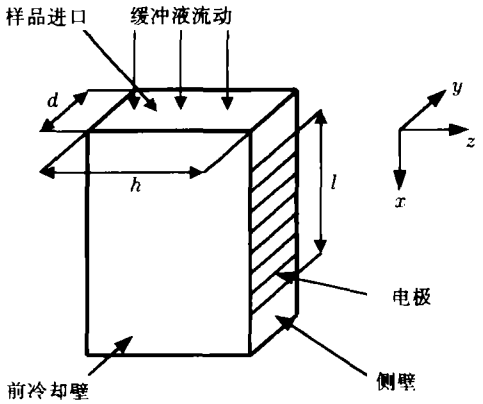


图 2　连续流电泳示意图

Fig.2　Schematic of continuous-flow electrophoresis

假设物性参数不受重力环境影响, 但均随介质温度而变化. 在 T_0 下, 物性参数用下标 "0" 表示 (如 ρ_0, η_0, σ_0, λ_0, β_0, D_0 等).

若电泳过程定常, 且没有离解 - 复合反应 (或离解 -复合反应不影响电流体力学过程), 则连续流电泳的电流体力学过程受上述 20 个因素 ($n = 20$) 的控制, 它们涉及 5 种基本量 ($n_0 = 5$). 根据 π 定理, 连续流电泳的电流体力学过程受 15 个 ($m = n - n_0$) 相似参数 $\pi_1, \pi_2, \cdots, \pi_m$ 的控制. 通过量纲分析可得出,

几何相似:

$$\pi_1 = h/d = \pi_b, \qquad \pi_2 = l/d = \pi_1. \tag{1}$$

动力相似:

$$\pi_3 = \frac{\rho u_0 d}{\eta_0} = Re \propto \frac{\text{流动惯性力}}{\text{黏性力}}. \tag{2a}$$

令 $v_0 = \eta_0/\rho_0$, 则

$$Re = \frac{U_0 d}{v_0}, \qquad Re\text{为 Reynolds 数}. \tag{2b}$$

$$\pi_4 = \frac{gl}{U_0^2} = Fr^2 \propto \frac{\text{重力位能}}{\text{流体动能}}, \quad Fr = \frac{\sqrt{gl}}{U_0}\text{为 Froude 数}. \tag{3}$$

$$\pi_5 = \frac{P_0}{P_0 gl} = \pi_p \propto \frac{\text{压力作用}}{\text{重力作用}}. \tag{4}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

$$\pi_6 = \frac{U_0^2}{C_p T_0} = \pi_k \propto \frac{\text{动能}}{\text{焓}}. \tag{5}$$

$$\pi_7 = \frac{T_w}{T_0} = \pi_T. \tag{6}$$

$$\pi_8 = \frac{P_0 C_p U_0 d}{\lambda_0} = Pe \propto \frac{\text{对流传热}}{\text{热传导}}, \tag{7a}$$

令热扩散系数 κ 为

$$\kappa = \frac{\lambda}{\rho p C_p}, \tag{7b}$$

则 $Pe = U_0 d/k_0$,

$$\pi_9 = \frac{\sigma_0 E_0^2 d^2}{\lambda_0 T_0} = \pi_H \propto \frac{\text{电热效应}}{\text{热传导}}, \tag{8a}$$

令电热效应引起的特征温升为

$$\Delta T = \frac{\sigma_0 E_0^2 d^2}{\lambda_0}, \tag{8b}$$

则

$$\pi_9 = \pi_H = \frac{\Delta T}{T_0},$$

$$\pi_{10} = \frac{\rho_0 v_0 U_0^2}{\lambda_0 T_0} = \pi_\phi \propto \frac{\text{黏性耗散}}{\text{热传导}}. \tag{9a}$$

可以看出,

$$\pi_\phi = Pr \cdot \pi_6, \tag{9b}$$

$$P_r = \frac{\rho_0 C_p v_0}{\lambda_0} = \frac{v_0}{\kappa_0} \propto \frac{\text{黏性}}{\text{热传导}}, \tag{9c}$$

$$\pi_{11} = \frac{\alpha_0 (T_0 - T_w) \cdot d}{\lambda_0 T_0} = \pi_\alpha \propto \frac{\text{壁面热交换}}{\text{热传导}}, \tag{10}$$

$$\pi_{12} = \frac{\beta_0 g d^2 \Delta T}{v_0 U_0} = \frac{\beta_0 \sigma_0 g E_0^2 d^4}{\lambda_0 v_0 U_0} = B \propto \frac{\text{浮力}}{\text{黏性力}}. \tag{11}$$

B 表征的电泳过程中, 外加电场作用产生的热效应引起局部温升 (温度梯度 $\rightarrow$ 密度梯度), 从而造成的浮力与流体黏性力之比. 对于连续流电泳电流体力学过程来说, 这是一个最重要的动力学相似参数.

通常在讨论温差引起的对流时, 常用 Rayleich 数 (Ra)

$$Ra = \frac{g\beta \Delta T d^3}{\kappa_0 v_0} = \frac{g\beta_0 \rho_0 C_p \sigma_0 E_0^2 d^5}{\lambda_0^2 v_0}. \tag{12a}$$

由方程 (7a) 和 (11) 可知:

$$Ra = B \cdot Pe, \tag{12b}$$

$$\pi_{13} = U_0 d / D_0 = Sc \propto \frac{\text{对流传质}}{\text{扩散传质}}, \tag{13}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

Sc 为 Schmidt 数.

$$\pi_{14}=\frac{C_0N_Aq_eE_0d}{\eta_0U_0}=\xi_0\propto\frac{\text{电场力}}{\text{黏性力}}. \tag{14}$$

N_A 为阿弗伽德罗常数.

$$\pi_{15}=\frac{q_e\lambda_0}{a_e\rho_0\beta_0\sigma_0gE_0d^4}=\pi_e\propto\frac{\text{电泳迁移}}{\text{浮力对流}}\propto\frac{\text{电渗}}{\text{浮力对流}}. \tag{15}$$

可见，在流动定常，且不记介质内部离解 -复合反应的条件下，空间连续流电泳电流体力学过程的地基模拟要求满足上述 15 个相似性条件，即：

$$[\pi_k]_G=[\pi_k]_S,\qquad k=1,2,\cdots,m=15. \tag{16}$$

下标 G 表示地基，S 表示空间.

可以看出，满足全部相似性条件是不可能的. 我们知道，连续流电泳在地面分离时效率不佳的原因主要是电热效应引起的浮力对流. 因此，空间连续流电泳电流体力学过程的地基模拟，首先必须满足浮力相似：

$$B_G=B_S. \tag{17a}$$

由此可得：

$$\mu=\frac{g}{g_0}=\left(\frac{E_{0G}}{E_{0S}}\right)^2\left(\frac{d_G}{d_S}\right)^4\left(\frac{U_{0S}}{U_{0G}}\right). \tag{17b}$$

g_0 为地面重力加速度，μ 为空间微重力水平.

电泳流动的 Reynolds 数不高，黏性效应起重要作用，而且必须考虑传热和传质过程. 因而要求满足 Reynolds 相似、Peclet 相似和 Schmidt 相似，即：

$$\begin{cases}[Re]_G=[Re]_S,\\ [Pe]_G=[Pe]_S,\\ [Se]_G=[Se]_S.\end{cases} \tag{18a}$$

由方程 (2)、(7a) 和 (13) 式可得：

$$[U_0d]_G=[U_0d]_S,\qquad \text{即}\qquad \frac{U_{0S}}{U_{0G}}=\frac{d_G}{d_S}. \tag{18b}$$

结合 (17a) 式可得浮力相似条件：

$$\mu=\left(\frac{E_{0G}}{E_{0S}}\right)^2\cdot\left(\frac{d_G}{d_S}\right)^5. \tag{19}$$

由方程 (12) 可见，此时 Rayleich 相似 ($[Ra]_G=[Ra]_S$) 同时满足.

其次，电泳迁移过程和电渗对连续流电泳分离过程有影响，π_e 相似，得：

$$\mu=\frac{g}{g_0}=\frac{E_{0G}}{E_{0S}}\cdot\left(\frac{d_G}{d_S}\right)^4. \tag{20}$$

显然，它与 Reynolds、Peclet、Schmidt 等相似不矛盾，条件 (18) 可同时满足.

一般电场强度 E_0 是实现样品分离提纯所必需的，在一定的分离带宽和分离长度下，主要决定于分离物和介质的电化学性质. 通常它不受重力环境的影响，故一般可取：

$$E_{0G}=E_{0S}=E_0. \tag{21}$$

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

这样，相似条件 (19) 和 (20) 分别可变为
浮力相似:

$$\mu = \left(\frac{d_G}{d_S}\right)^5, \tag{22}$$

电泳迁移，电渗相似:

$$\mu = \left(\frac{d_G}{d_S}\right)^4, \tag{23}$$

再者， Froude 相似要求:

$$\mu = \left(\frac{d_G}{d_S}\right)^3. \tag{24}$$

显然，条件 (22)、(23)、(24) 不能同时满足. 而对连续流电泳过程来说，由于流动 Reynolds 相当低，故 Froude 相似在此不予考虑. 而横向流动 (z 方向)，包括电渗流动在内，与主流 (U_0) 相比是小量. 故电渗等为二级效应，故对空间连续流电泳电流体力学过程的地基模拟来说，主要考虑浮力相似准则 (方程 (22)).

此外， π_r、π_p 相似，分别要求:

$$\left[\frac{T_W}{T_0}\right]_G = \left[\frac{T_W}{T_0}\right]_S, \tag{25}$$

$$\frac{P_{0G}}{P_{0S}} = \left(\frac{d_G}{d_S}\right)^4 \text{ 或 } \frac{P_{0G}}{P_{0S}} = \left(\frac{d_G}{d_S}\right)^3, \tag{26}$$

应该指出，条件 (26) 实际上只是表示在空间微重力环境中建立稳定的连续流电泳流场所需要的驱动力比地面环境下低得多.

综上所述，在地面重力条件下，模拟空间连续流电泳，要达到完全相似是不可实现的. 只能近似相似，相似准则除了几何相似:

$$h_G/h_S = d_G/d_S, \quad l_G/l_S = d_G/d_S \tag{27}$$

外，主要是浮力相似 (或 Rayleich 相似)，方程 (22) 和 π_r、π_p 相似 (方程 (25) 和 (26)). 满足相似条件 (22) 时， Reynolds 相似、 Peclet 相似、 Schmidt 相似自动满足，而 Prandtl 数与重力环境无关.

应该指出，若欲强调电渗效应，要求模拟电迁移过程，或者主流速度很低，(或者非连续流电泳)，则电流体力学过程的动力学相似准则，亦可用 π_e 相似，即方程 (23)，当然，此时还应满足相似性条件 (18a)、(25) 和 (26).

3 电流体力学相似性的数值实验

作为上述相似性准则的一种检验，进行了数值模拟实验 (Numerical Experiment). 假设:

(1) 流动定常，进口速度均匀 (U_0 =const.);

(2) 采用 Bussinisq 近似，温度变化引起的密度改变视作局部效应，整个流动仍可作为不可压缩流体处理;

(3) 物性参数随温度的变化可作线性近似.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

取坐标系如图 2 所示，坐标原点位于底面中心，可得基本方程组：

连续方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0, \tag{28}$$

运动方程：

$$\begin{cases} u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+w\dfrac{\partial u}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial x}+\nu_0\Delta u-g[1-\beta_0(T-T_{\mathrm{w}})], \\ u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+w\dfrac{\partial v}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial y}+\nu_0\Delta v, \\ u\dfrac{\partial w}{\partial x}+v\dfrac{\partial w}{\partial y}+w\dfrac{\partial w}{\partial z}=-\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial z}+\nu_0\Delta w+f_E. \end{cases} \tag{29a}$$

$$\Delta=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2},\quad f_{\mathrm{e}}=CN_{\mathrm{A}}q_{\mathrm{e}}E_0. \tag{29b}$$

N_{A} 为阿弗伽德罗常数.

温度场：

$$\rho_{\mathrm{c}}C_{\mathrm{p}}\Big[u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\Big]=\frac{\partial}{\partial x}\Big[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\Big]+\frac{\partial}{\partial y}\Big[\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\Big]+\frac{\partial}{\partial z}\Big[\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\Big]+\eta_0\phi+\sigma E_0^2, \tag{30a}$$

$$\phi\simeq\Big(\frac{\partial u}{\partial y}\Big)^2+\Big(\frac{\partial u}{\partial z}\Big)^2\quad(\text{为黏性耗散率}). \tag{30b}$$

浓度场：

$$u\frac{\partial c}{\partial x}+v\frac{\partial c}{\partial y}+(w+w_{\mathrm{e}})\frac{\partial c}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\Big[D\frac{\partial c}{\partial x}\Big]+\frac{\partial}{\partial y}\Big[D\frac{\partial c}{\partial y}\Big]+\frac{\partial}{\partial z}\Big[D\frac{\partial c}{\partial z}\Big], \tag{31a}$$

$$w_{\mathrm{e}}=\frac{q_{\mathrm{e}}E_0}{6\pi\eta_0 a_{\mathrm{e}}}\quad(\text{为电泳迁移率}). \tag{31b}$$

物性方程：

$$\begin{cases} \sigma=\sigma_0\Big[1+\sigma_1\Big(\dfrac{T-T_{\mathrm{w}}}{\Delta T}\Big)\Big], \\ \lambda=\lambda_0\Big[1+\lambda_1\dfrac{(T-T_{\mathrm{w}})}{\Delta T}\Big]. \end{cases} \tag{32}$$

边界条件：

$$\begin{cases} x=0, & u=U_0,\ v=0,\ w=0,\ T=T_0,\ C=C_0; & (33) \\ y=\pm\dfrac{d}{2}, & U=0,\ v=0,\ w=0,\ T=T_{\mathrm{w}},\ C=C_0; & (34) \\ z=\pm\dfrac{h}{2}, & U=0,\ v=0,\ w=0,\ T=T_{\mathrm{w}},\ C=C_0. & (35) \end{cases}$$

由于实际电泳分离，待分离样品总是从进口端 ($x=0$ 处) 的一个狭缝 ($h_{\mathrm{e}}\cdot d$, $h_{\mathrm{e}}\ll h$) 中注入缓冲液流场的. 样品流量远远小于缓冲液流量. 故可以认为浓度场本身对速度场和温度场的影响可以忽略不计，因而浓度场可以和速度场、温度场解耦. 这里主要考虑速度场和温度场的耦合作用.

取特征长度 d、特征速度 U_0、特征温度 ΔT、将上述方程无量刚化，令：

$$\theta=\frac{T-T_{\mathrm{w}}}{\Delta T},\quad T_{\mathrm{w}}=\text{const.}\ (\text{壁面等温}). \tag{36}$$

无量刚坐标和无量刚速度，仍记作 $\{x,y,z\}$ 和 $\{u,v,w\}$、得无量刚方程组：

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

速度场:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0. \tag{37}$$

$$\begin{cases} u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+w\dfrac{\partial u}{\partial z}=-\dfrac{\partial p}{\partial x}+\dfrac{1}{Re}\Delta u-F^2d+\dfrac{B}{Re}\theta, \\ u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+w\dfrac{\partial v}{\partial z}=-\dfrac{\partial p}{\partial y}+\dfrac{1}{Re}\Delta v, \\ u\dfrac{\partial w}{\partial x}+v\dfrac{\partial w}{\partial y}+w\dfrac{\partial w}{\partial z}=-\dfrac{\partial p}{\partial z}+\dfrac{1}{Re}\Delta w. \end{cases} \tag{38}$$

$$F^2d=\frac{gd}{U_0^2}.$$

温度场:

$$\frac{\partial}{\partial x}\Big[(1+\lambda_1\theta)\frac{\partial\theta}{\partial x}\Big]+\frac{\partial}{\partial y}\Big[(1+\lambda_1\theta)\frac{\partial\theta}{\partial y}\Big]+\frac{\partial}{\partial z}\Big[(1+\lambda_1\theta)\frac{\partial\theta}{\partial z}\Big]+\frac{Pr\,\theta_0}{Ne}\varphi+(1+\sigma_1\theta)=Pe\Big[u\frac{\partial\theta}{\partial x}+v\frac{\partial\theta}{\partial y}+w\frac{\partial\theta}{\partial z}\Big], \tag{39a}$$

这里,

$$\begin{cases} Ne=\dfrac{C_{\rm p}-(T-T_{\rm w})}{U_0^2}\ (\text{相当于相似参数}\pi_6); \\ \Big(\theta_0=\dfrac{T_0-T_{\rm w}}{\Delta T}\Big); \\ \varphi=\Big(\dfrac{\partial u}{\partial y}\Big)^2+\Big(\dfrac{\partial u}{\partial z}\Big)^2. \end{cases} \tag{39b}$$

边界条件:

$$x=0,\qquad u=1,\ v=0,\ w=0,\ \theta=0; \tag{40}$$

$$y=\pm\frac{1}{2},\qquad u=1,\ v=0,\ w=0,\ \theta_0=0; \tag{41}$$

$$z=\pm\frac{h}{2a},\qquad u=1,\ v=0,\ w=0,\ \theta=0. \tag{42}$$

用有限差分法解方程组 (37)—(42), 在两组条件下进行数值试验:

$$\begin{cases} g=g_0,\ d=d_{\rm G}=0.5\,{\rm mm}; \\ d_{\rm G}/d_{\rm S}=0.1; \\ g=10^{-5}g_0,\ d=d_{\rm S}=5{\rm mm}. \end{cases} \tag{43}$$

其他条件和物性参数均相同, 列于下:

$l=120\,{\rm mm}$, $h=60\,{\rm mm}$, $U_0=0.2\,{\rm cm/s}$, $T_0=10^{\circ}{\rm C}$.

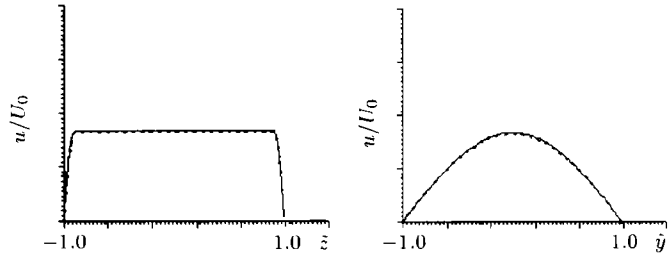
$T_{\rm w}=15^{\circ}{\rm C}$, $E_0=50\,{\rm V/cm}$, $\rho_0=1.02\,{\rm g/cm^3}$, $g_0=980\,{\rm cm/s^2}$.

$\eta_0=1.33\times10^{-2}\,{\rm g/cm\cdot s}$, $\lambda_0=5.82\times10^{-2}\,{\rm W/cm\cdot(^{\circ}C)}$, $\lambda_1=9.10\times10^{-2}$.

$\sigma_0=6.70\times10^{-4}L/\Omega\cdot{\rm cm}$, $\sigma_1=1.1\sigma_0$, $\beta_0=8.62\times10^{-5}L/(^{\circ}{\rm C})$.

典型结果如图 3 所示, 这是 $x=1/2$ 处的主流 (u) 速度分布, 图中横坐标分别以 h 和 d 归化, 即 $z=z/2$, $h=y/2d$.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



—— $d_S = 5\,\mathrm{mm}$, $g = 10^{-5}g_0$　　- - - $d_G = 0.5\,\mathrm{mm}$, $g = g_0$

(a) u/U_0 沿 $z = z/2h$ 分布　　(b) u/U_0 沿 $y = y/2d$ 分布

图 3　u/U_0 分布

Fig.3　Distribution of u/U_0

可见，当 $d_G/d_S = 10^{-1}$ 时，地面重力条件 $g_0(d_G)$ 下连续流电泳流场，主流速度分布 ($u-z$ 剖面和 $u-y$ 剖面)，和空间微重力条件 $g = 10^{-5}g_0(d_S)$ 时的主流速度分布非常一致. 李松，严宗毅等 [3] 和蔡立，陶祖莱 [4] 的理论近似和数值分析表明，在地面重力条件下，$d_G = d_S(d_G/d_S = 1)$ 时，主流速度分布与 $d_G/d_S = 10^{-1}$ 时，有本质区别.

数值模拟表明，可以通过改变电泳流槽间距 d，在地面重力条件下模拟空间连续流电泳的流场 (主流流场)、所模拟的微重力水平，符合相似准则：

$$\mu = g/g_0 = (d_G/d_S)^5. \tag{44}$$

综上所述，数值模拟实验表明，本文第2部分提出的相似准则 (方程 (22) 等) 是有效的，可用于空间连续流电泳电流体力学过程的地基模拟. 当然，这是一种近似，而且有待空间实验的进一步验证.

4　空间连续流电泳电流体力学过程地基模拟实验系统

根据上述相似性分布，参考美，欧诸国发展空间连续流电泳装置选择连续流电泳电流体力学过程地基模拟实验系统的实验段前后壁间距 $d = 0.5, 1.0, 3.0\,\mathrm{mm}$，$h = 60\,\mathrm{mm}$，$l = 120\,\mathrm{mm}$. 应该指出，尽管几何相似要求 $(h_G/h_S) = (d_G/d_S)$，$(l_G/l_S) = (d_G/d_S)$ 而 d_G/d_S 一般取 0.1. 但地基模拟的 h_G/h_S、l_G/l_S 很难 (甚至不可能) 达到这一要求，而且亦不一定必须. 因为，实际上 h 主要应满足分离精度的需要，分离道数多，则精度高，这要求适当的流槽宽度，h 不宜过小，而 l 的选取，主要取决于样品分离的精度，亦和 E_0、U_0 有关. 而且，h 和 l 之间，要求适当的匹配. 这决定于样品、介质的电化学特性及电场强度等. 考虑到这些因素，我们的地基模拟实验系统中，电泳室的 h 和 l 是固定的.

图 4 是连续流电泳电流体力学地基模拟实验系统的示意图，为了精确控制电泳室前、后壁壁温，使 T_W =const. 采用前后壁双水冷却，示意图如图 5 所示.

用该地基模拟实验系统分离血红蛋白 (Hb) 和细胞色素 C(Cyt.C) 的实验结果示于图 6.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

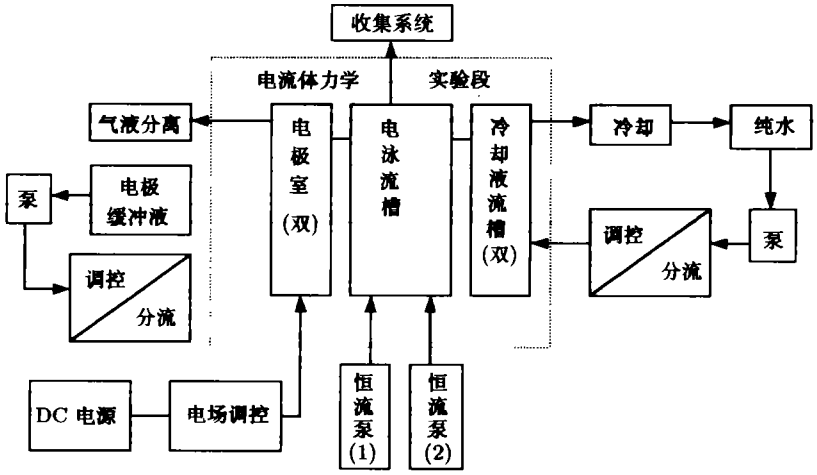


图 4 连续流电泳电流体力学地基模拟实验系统示意图

Fig.4 Schematic of CFE ground-based mimicking experimental system

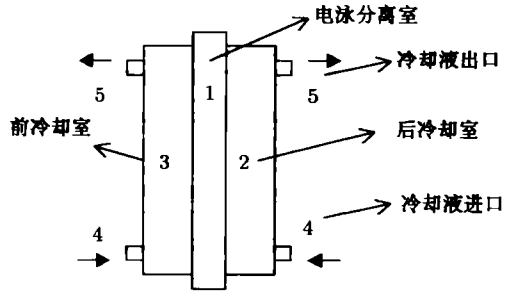


图 5 电泳室冷却结构示意图

Fig.5 Schematic of electrophoresis chamber and the cooling structure

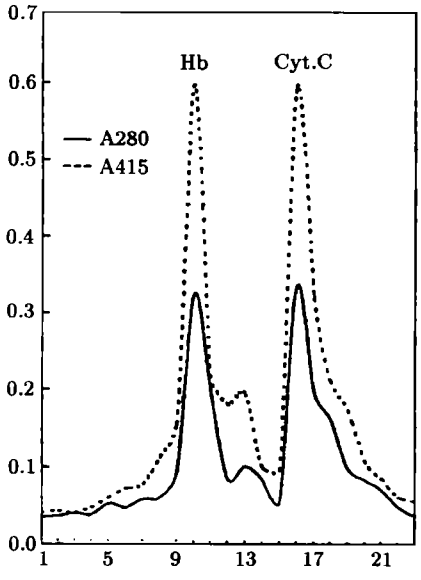


图 6 用该地基模拟实验系统分离血红蛋白(Hb)和细胞色素 C(Cyt.C)的实验结果

Fig.6 Separation of Hb and Cyt.C in CFE apparatus

为尽可能满足温度场相似性的要求，考虑到 π_α(方程 (10)) 相似的条件：

$$\frac{\alpha_G}{\alpha_S} = \frac{d_S}{d_G}. \tag{45}$$

电泳室前后壁材料选用浮法玻璃，其热交换效率比空间电泳常用的有机玻璃、聚酯材料等高一个数量级.

此外，相似参数 π_p 要求地基模拟系统中电泳室进口流动压力足够高，故系统中驱动

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

装置采用双柱塞泵，以保证足够的压力.

5　结语

从相似性分析得到了空间连续流电泳电流体力学过程地基模拟实验系统的相似参数，数值模拟初步证明了所得相似准则的有效性. 在此基础上建立了空间连续流电泳电流体力学过程地基模拟实验系统，并进行了生物样品分离实验. 相似准则的最终检验，有待于空间实验.

参 考 文 献

[1] Todd P. Space bioprocessing. *Bio/Technology*, 1985, **3**:786—790
[2] 陶祖莱. 关于微重力电流体力学. 力学进展, 1990, **20**(1):69—82
[3] 李松, 严宗毅, 温功碧, 陶祖莱. 连续流式电泳浓度场的三维分析. 力学学报, 1993, **25**(1):29—39
[4] 蔡立, 陶祖莱. 对连续流式电泳简化数学模型的研究. 中国空间科学技术, 1995, **6**:19—27
[5] Saville D A. *Phys. Chem. Hydrodyn*, 1980, **1**:297

THE GROUND-BASED MIMICKING OF SPACE CONTINUOUS-FLOW ELECTROP HORESIS ELECTROHYDROMECHANICS

TAO Zulai[1]　JIAN Laicheng[2]　LI Tao[1]　GAO Yuxin[1]
[1](*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)
[2](*Taibei Physics Institute*)

Abstract

Principle of similarity between the electrohydromechanic process of continuous-flow electrophoresis carried out in space and that of ground-based mimicking was established by similitude analysis. Numerical simulation demonstrated the effectiveness (approximate) of this treatment. Based on these theoretical works, ground-based experimental system mimicking the electrohydromechanic process of continuous-flow electrophoresis in space was developed and used for separation of biological samples, and of course, final test of the principle of similarity depends on space experiments.

Key words　Continuous-flow, Electrophoresis, Electrohydromechanics, Similarity

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com