

电场作用下多细胞膜电场应力分布

李倩南¹, 张辉^{1,2}, 王青³, 武瑞青⁴

1. 西安工业大学基础学院, 陕西 西安 710021; 2. 咸阳师范学院物理与电子工程学院, 陕西 咸阳 712000; 3. 西安电子科技大学电子工程学院, 陕西 西安 710071; 4. 西藏民族大学附属中学, 陕西 咸阳 712000

【摘要】目的:在电场作用下,多细胞相对位置对电场应力分布的影响。**方法:**对于单细胞,通过求解满足边界条件的拉普拉斯方程,对于多细胞利用电磁场仿真软件ANSYS-Maxwell求解细胞内外电场分布。用麦克斯韦应力张量法分析细胞电场应力分布。**结果:**与单个细胞相比,电场作用于3个细胞时,细胞表面电场应力分布仍具有一定的对称性,细胞间距变化时,细胞间感应强度也相应发生变化。在细胞间距足够大的情况下,各细胞间的相互影响非常小,可以将其近似为单细胞模型处理。**结论:**细胞数目和细胞间距都会影响细胞表面电场应力的分布情况,细胞在电场作用下发生的形变与细胞表面所受电场应力有关。

【关键词】多细胞;电场应力;形变;非热效应

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)12-1560-09

Electric field stress distribution on multicellular membranes under electric field

LI Qiannan¹, ZHANG Hui^{1,2}, WANG Qing³, WU Ruiqing⁴

1. School of Sciences, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2. College of Physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000, China; 3. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 4. Middle School Affiliated to Tibet University for Nationalities, Xianyang 712000, China

Abstract: Objective To study the effect of the relative positions among multiple cells on electric field stress distribution under electric field. **Methods** The electric field distributions both inside and outside a single cell were obtained by solving the Laplace equations that satisfied the boundary conditions, while those of multiple cells were obtained by electric field simulation software ANSYS-Maxwell. The corresponding electric field stress distribution was analyzed using Maxwell stress tensor method. **Results** The distribution of electric field stress on the cell surface had certain symmetry for 3-cell system, compared with that of a single cell. The induction intensity between cells changed with cell spacing. When the cell spacing was large enough, the interaction between cells turned negligible, and it could be approximated as a single cell model. **Conclusion** The distribution of electric field stress on the cell surface is affected by the number and spacing of cells. The cell deformation under electric field is related to the electric field stress on the cell surface.

Keywords: multiple cells; electric field stress; deformation; athermal effect

前言

电磁场作用于生物系统,引起生物系统结构、功能等方面的改变,称为电磁场生物学效应^[1-2]。按其产生的原因,可分为热效应与非热效应^[3]。热效应与生物体吸收电磁波能量后产生的温度升高有关,非热效应则与这种温度的升高无关^[4]。近年来,在细胞水平上,非热效应仍是电磁场生物学效应研究的热

点问题^[5],研究发现电场能引起细胞形变^[6]、融合^[7-8]、旋转等^[9],进而影响细胞生理功能。研究认为,细胞在电场作用下发生的这一系列变化是细胞膜表面电场应力作用的结果^[10]。

关于电场对生物细胞影响的研究,20世纪50年代末,Schwan^[11]将细胞建模为具有特定电特性的简单几何体,开始了一系列关于电场对生物细胞影响的研究。20世纪70年代早期,Frieske等^[12-13]提出了脂质双层弹性理论,并估计了外场对磷脂囊泡形状的影响。对于细胞所受电场应力与形变的研究已有许多学者做了大量工作。20世纪90年代初,Hyuga等^[14]结合麦克斯韦应力法提出用小变形理论来解释细胞形变。之后牛中

【收稿日期】2021-07-16

【作者简介】李倩南,硕士,研究方向:生物物理,E-mail: 2321887532@qq.com

奇^[15]用力密度表达式推导了静息电位时细胞膜所受的自电场应力。武瑞青等^[10]用麦克斯韦应力张量方法分析球形细胞膜上电场应力的大小及分布等。这些研究讨论了电场中单细胞电场应力的分布, 其中对细胞空间电场分布的研究, 理论计算方法有分离变量法、电像法、格林函数法、电多级展开等^[16]。

对于电场作用下多细胞空间电场分布以及电场应力分布相关的研究报导较少。考虑到在电场中有多个细胞的情况下, 用电磁场仿真软件更易分析细胞内外电场分布。基于此, 本文以3个相同的球形细胞作为研究对象, 用ANSYS-Maxwell电磁仿真软件求解研究区域的电场分布, 应用麦克斯韦应力法, 分析在电场作用下细胞表面的电场应力分布规律。

1 细胞模型

研究表明, 除个别鸟类, 几乎所有生物组织都是非磁性物质^[17], 本文分析电场作用下细胞空间电场和细胞表面电场应力分布, 假设讨论的细胞为球形细胞, 该细胞由细胞质、细胞膜、细胞外液3部分组成, 图1a为球壳模型。其中 R_0 为细胞膜外半径, d 为膜厚度, θ 为测量的极性方向与外电场方向的夹角, ε_i 、 ε_e 、 ε_m 分别为细胞质、细胞膜、细胞外液的介电常数^[18], 细胞在各区域内磁导率均为 μ_0 。根据内部均质化原理^[19], 细胞可以等效为介电常数为 ε 的介质球, 图1b为细胞等效介质球模型, 其中等效介质球相对介电常数为:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \frac{R^3(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m) + 2a^3(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}{R^3(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m) - a^3(\varepsilon_i - \varepsilon_m)}, a = R - d \quad (1)$$

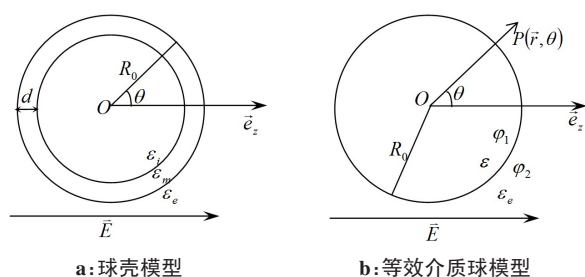


图1 单细胞物理模型

Fig.1 Single-cell physical model

2 理论分析

2.1 单细胞内外场分布

将等效介质球作为研究对象, 以介质球球心为原点, 外电场 \vec{E} 方向为Z轴建立球坐标系, 取外电场大小为 E_0 ^[20], 则 $\vec{E} = E_0 \vec{e}_z$ 。若取球内外电势分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 , 由电磁场理论得到:

$$\begin{cases} \nabla^2 \phi_1 = 0, r < R \\ \nabla^2 \phi_2 = 0, r > R \end{cases} \quad (2)$$

ϕ_1 、 ϕ_2 满足边值关系的边界条件为:

$$\begin{cases} r \rightarrow 0, & \phi_1 \text{ 为有限值} \\ r = R, & \begin{cases} \phi_1 = \phi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \phi_1}{\partial r} = \varepsilon_2 \frac{\partial \phi_2}{\partial r} \end{cases} \\ r \rightarrow \infty, & \phi_2 = -R \cos \theta E_0 \vec{e}_z \end{cases} \quad (3)$$

解上述满足边值关系的拉普拉斯方程, 可得:

$$\begin{cases} \phi_1 = -\frac{3\varepsilon_e}{\varepsilon + 2\varepsilon_e} r \cos \theta E_0 \vec{e}_z \\ \phi_2 = -r \cos \theta E_0 \vec{e}_z + \frac{\varepsilon - \varepsilon_e}{\varepsilon + 2\varepsilon_e} \frac{R^3 \cos \theta}{r^2} E_0 \vec{e}_z \end{cases} \quad (4)$$

假设球内外电场分别为: $\vec{E}_1 = E_{1r} \vec{e}_r + E_{1t} \vec{e}_t$, $\vec{E}_2 = E_{2r} \vec{e}_r + E_{2t} \vec{e}_t$, 由 $\vec{E} = -\nabla \phi$, 则:

$$\begin{cases} \vec{E}_{1r} = \frac{3\varepsilon_e}{\varepsilon + 2\varepsilon_e} \cos \theta E_0 \vec{e}_z \\ \vec{E}_{1t} = -\frac{3\varepsilon_e}{\varepsilon + 2\varepsilon_e} \sin \theta E_0 \vec{e}_z \\ \vec{E}_{2r} = \cos \theta E_0 \vec{e}_z + \frac{2(\varepsilon - \varepsilon_e)}{\varepsilon + 2\varepsilon_e} \frac{R^3 \cos \theta}{r^3} E_0 \vec{e}_z \\ \vec{E}_{2t} = -\sin \theta E_0 \vec{e}_z + \frac{\varepsilon - \varepsilon_e}{\varepsilon + 2\varepsilon_e} \frac{R^3 \sin \theta}{r^3} E_0 \vec{e}_z \end{cases} \quad (5)$$

当 $r=R$ 时, \vec{E}_{2r} 和 \vec{E}_{2t} 分别为介质球表面电场强度的法向分量与切向分量, 如图2所示。

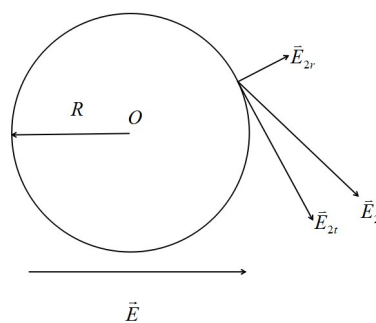


图2 电场强度分量图

Fig.2 Components of electric field intensity

2.2 单细胞膜电场应力

电磁波具有动量, 入射到细胞表面, 会对细胞施加一定压力, 表现为膜上的电场应力。电磁场动量流密度 \vec{T} 为:

$$\vec{T} = -\vec{E} \vec{D} - \vec{B} \vec{H} + \frac{1}{2} \vec{I} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{B} \cdot \vec{H}) \quad (6)$$

式中, \vec{I} 为单位张量。在外电场的作用下, 施加至细胞表面单位面积电场应力的平均值 \vec{P} 为:

$$\vec{P} = \left\langle -\vec{e}_r \cdot \vec{T}_e \right\rangle = \frac{1}{4} \text{Re} \left(\epsilon_e \vec{E}_{2r} \cdot \vec{E}_{2r}^* - \epsilon_e \vec{E}_{2t} \cdot \vec{E}_{2t}^* \right) \vec{e}_r$$
$$+ \frac{1}{4} \text{Re} \left(\epsilon_e \vec{E}_{2r} \cdot \vec{E}_{2t} \right) \vec{e}_t = \vec{P}_r \vec{e}_r + \vec{P}_t \vec{e}_t \quad (7)$$

细胞表面电场应力的法向分量和切向分量分别为:

$$\begin{cases} P_r = \frac{1}{4} \epsilon_e \left(\vec{E}_{2r} \cdot \vec{E}_{2r}^* - \vec{E}_{2t} \cdot \vec{E}_{2t}^* \right) \\ P_t = \frac{1}{4} \epsilon_e \left(\vec{E}_{2r} \cdot \vec{E}_{2t} \right) \end{cases} \quad (8)$$

3 数值分析与讨论

本文讨论对单细胞的电场分布通过解析方法进

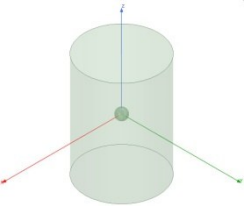
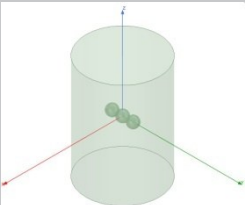
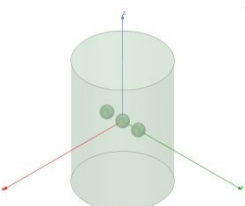
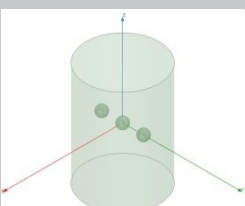
行求解,见2.1节。对电场作用于3个细胞时,细胞表面的电场分布通过ANSYS-Maxwell电磁场仿真软件进行求解,电场应力分布通过麦克斯韦应力法进行分析。

3.1 外场与细胞相互作用模型

本文分析电场与细胞之间的相互作用模型见表1。考虑细胞几何参数典型值常取细胞膜厚度7.5~16.5 nm,细胞平均直径10~20 μm^[18]。本数值分析中取电场强度E=1 000 V/m,若取ε_i=136、ε_m=10.3、ε_e=80^[10, 21],R₀=10 μm、d=8 nm,由式(1)得到等效介质球相对介电常数ε=134.5。

表1 电场与细胞相互作用模型

Tab.1 Electric field-cell interaction models

方案	模型	位置	中心坐标	对称轴	半径/μm	相对介电常数
1			(0, 0, 0)	z	10	134.5
2		右	(0, 20, 0)	z	10	134.5
		中	(0, 0, 0)			
		左	(0, -20, 0)			
3		右	(0, 30, 0)	z	10	134.5
		中	(0, 0, 0)			
		左	(0, -30, 0)			
4		右	(0, 40, 0)	z	10	134.5
		中	(0, 0, 0)			
		左	(0, -40, 0)			

3.2 电场与应力分析

3.2.1 单个细胞与电场相互作用 图3给出电场中没有细胞时的电场线分布,图4、图5分别给出表1中方案1所示单个细胞与电场相互作用后的电场线分布、电场随角度θ变化关系。图5显示,外加电场为1 000 V/m时,细胞表面法向电场强度E_r与角度θ成余弦关系,在θ=0°、180°、360°处取得最大值约1 360 V/m。切向电场强度E_t与角度θ成正弦关系,在90°和270°

处最大约819.8 V/m。比较图3、图4发现,外加电场作用于单个细胞时,细胞外电场由均匀场变为不均匀场。这是由于细胞和外电场相互作用时,在细胞表面产生感应电荷,进而产生感应电场,感应电场和原电场的叠加形成细胞外新的电场,表现在靠近细胞表面的电场发生明显变化。

图6、图7分别给出单个细胞表面力密度分布和其在电场中所受法向电场应力P_r和切向电场应力P_t

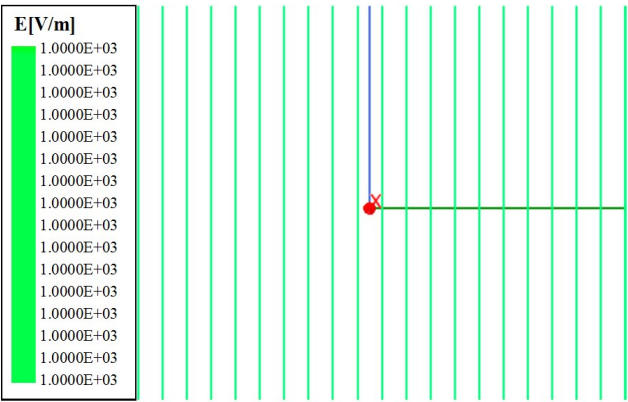


图 3 无细胞时电场线分布
Fig.3 Electric field line distribution with no cells

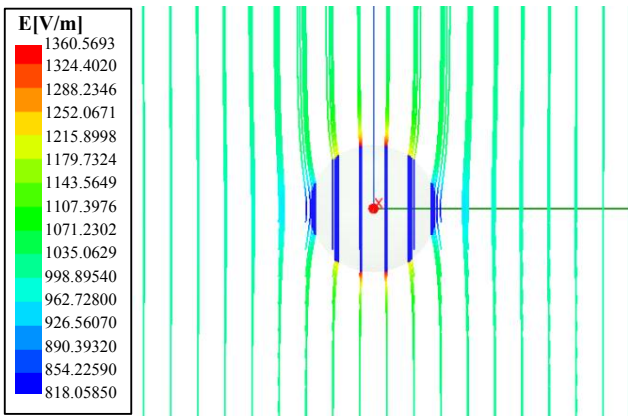


图 4 单个细胞时细胞空间电场线分布
Fig.4 Electric field line distribution with a single cell

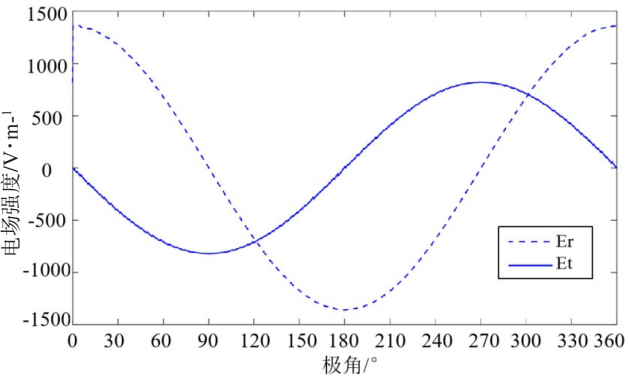


图 5 细胞表面电场随极角变化关系
Fig.5 Electric field on the cell surface changing with polar angle

随 θ 变化关系。图 6 显示,沿 z 轴方向细胞表面力密度最大, xoy 面细胞表面力的方向向坐标原点方向,这可以解释在电场力作用下,细胞有从球形变为椭球形的趋势;图 7 显示法向电场应力 P_r 与角度 θ 成余弦关系,在 $\theta=0^\circ$ 、 180° 、 360° 处取得最大值约 4.107×10^{-4} Pa,此时 P_r 垂直细胞表面向外,表现为对细胞的拉力,细胞在电场方向被拉伸; P_r 在 $\theta=90^\circ$ 、 270° 处最小,约 -1.475×10^{-4} Pa,此时 P_r 垂直细胞表面向内,表现

为对细胞的压力,垂直电场方向细胞被压缩。
结论(1):单个细胞与电场相互作用时,细胞有从球形变为椭球形的趋势。

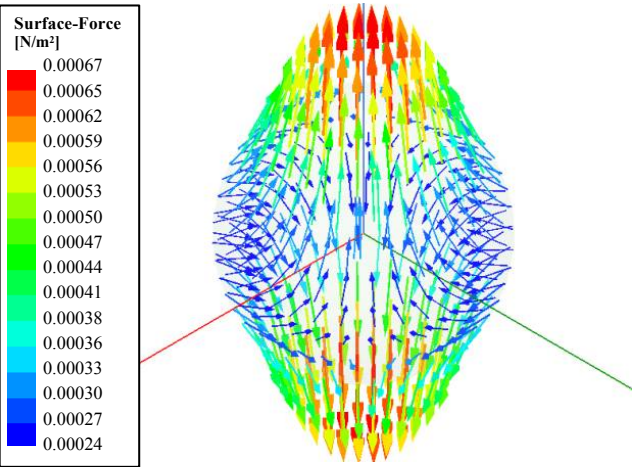


图 6 细胞表面力密度分布
Fig.6 Distribution of the surface force density of cell

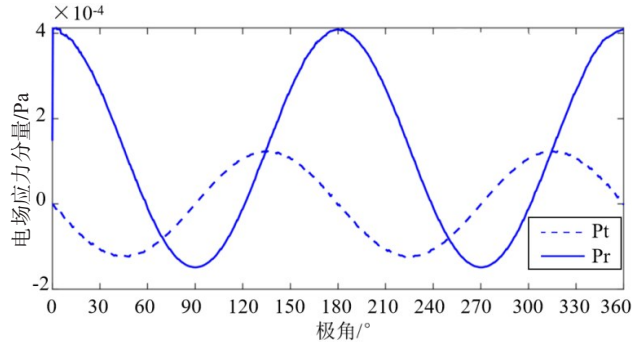


图 7 法向和切向电场应力随极角变化关系
Fig.7 Normal and tangential electric field stresses changing with polar angle

3.2.2 3 个细胞与电场相互作用 本文中中间细胞、左边细胞、右边细胞分别记为细胞 1、细胞 2、细胞 3,图 8、图 9 和图 10 分别给出表 1 中方案 2 电场与细胞相互作用时的电场分布云图、电场线分布图、细胞表面电场随极角变化关系图。在方案 2 中 3 个细胞相互接触沿一条直线放置,且细胞球心连线与外电场垂直。图 8、图 9 显示电场与 3 个细胞相互作用后,各个细胞电场重新分布且关于 y 轴对称,无穷远处电场强度恒定为外电场 \vec{E} 。对比图 9 与图 4 发现,沿电场方向细胞表面电场强度都获得加强,垂直电场方向细胞表面电场强度都减弱,细胞相切处电场强度最小。图 10 中细胞 1、2、3 的法向、切向电场强度随角度 θ 变化情况为 E_{r1} 、 E_{r2} 、 E_{r3} 和 E_{t1} 、 E_{t2} 、 E_{t3} 。细胞 2 和细胞 1 胞在 $\theta=90^\circ$ 接触,此位置 $E_{r1}\approx E_{r2}\approx 0$ V/m, $E_{t1}=-698.94$ V/m, $E_{t2}=699.11$ V/m,细胞 2 和细胞 1 接触位置电场强度相

互抵消,使接触点场强最小约为0 V/m。同理细胞3和细胞1接触点由于电场相互抵消,场强最小。

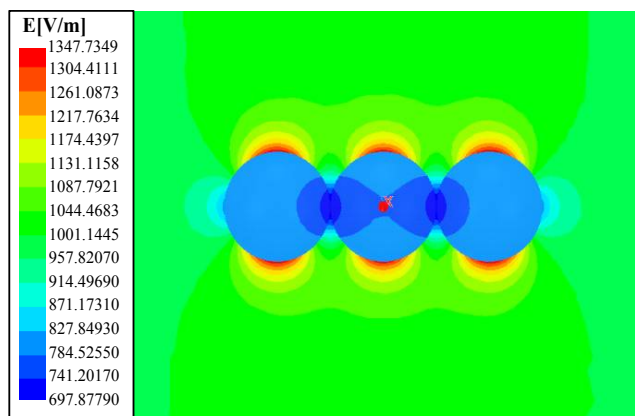


图8 3个细胞电场分布云图

Fig.8 Three-cell electric field distribution nephogram

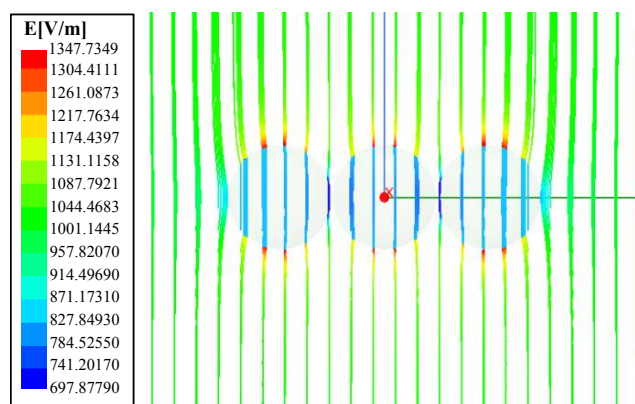


图9 3个细胞电场线分布

Fig.9 Three-cell electric field line distribution

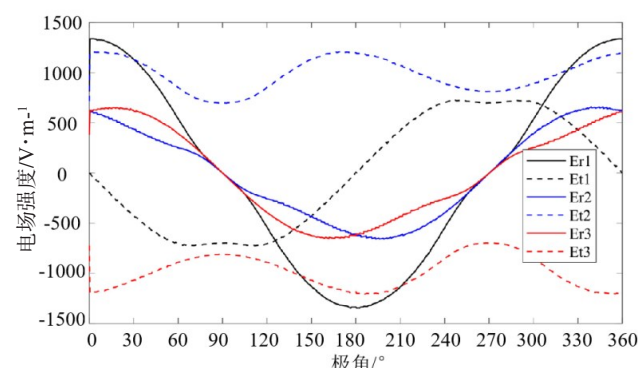


图10 细胞表面电场随极角变化关系

Fig.10 Electric field on cell surface changing with polar angle

图11、图12分别给出电场与细胞1、2、3相互作用时,细胞膜受到的电场应力和切向电场应力随角度 θ 变化关系图。图11显示细胞1在 θ 为 0° 、 180° 、 360° 时细胞表面电场应力 P_1 达到最大值 4×10^{-4} Pa;

细胞2在 θ 为 15° 、 165° 、 360° 时 P_2 达到最大值 2.9×10^{-4} Pa;细胞3在 θ 为 0° 、 195° 、 345° 时 P_3 达到最大值 2.9×10^{-4} Pa。与单个细胞和电场相互作用比较发现,细胞2、细胞3电场应力最大值降低约 1.207×10^{-4} Pa,此时电场应力表现为对细胞的拉力作用,使细胞被拉伸并有沿电场方向变形的趋势,细胞1变形较大。图12显示细胞2(3)在 θ 为 0° 到 180° (180° 到 360°)内 P_2 变化趋势与细胞3(2)在 θ 为 180° 到 360° (0° 到 180°)内 P_3 变化趋势相同,在 θ 为 0° 、 180° 处细胞2和细胞3切向电场应力大小相等,方向相反,细胞有旋转的趋势。

结论(2):3个细胞和电场相互作用时,细胞表面电场应力分布有一定的对称性。在法向电场应力作用下细胞发生形变,在切向电场应力的作用下细胞2、3有旋转的趋势。

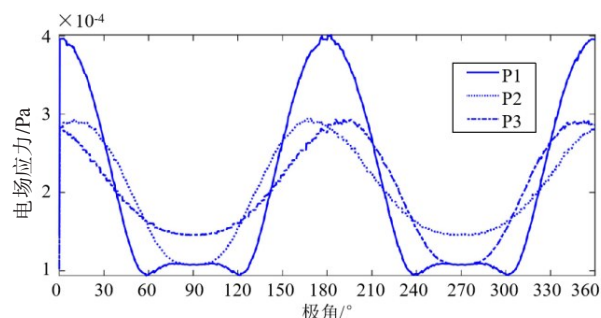


图11 电场应力随极角变化关系

Fig.11 Electric field stress changing with polar angle

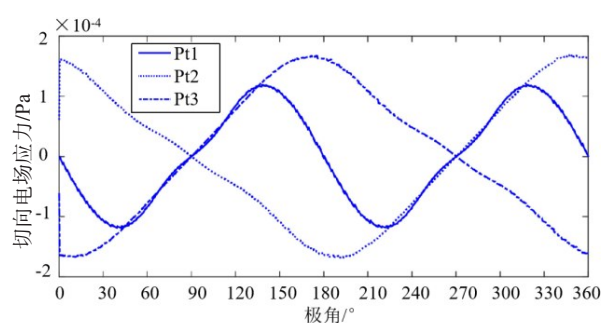


图12 切向电场应力随极角变化关系

Fig.12 Tangential electric field stress changing with polar angle

3.3 对不同间距(d)下3个细胞与电场相互作用的讨论

对不同间距(d)下3个细胞与电场相互作用的讨论中,相互作用模型见3.1节方案2、3、4。

3.3.1 间距对细胞空间电场分布的影响分析 图13a~图13c和图14a~图14c分别给出细胞1、2、3之间距离 d 为0、10、20 μm 时细胞空间电场分布云图和细胞空间电场线分布。对比图14a~图14c(图13a~图13c)发

现,当 d 由 $0\text{ }\mu\text{m}$ 变化至 $20\text{ }\mu\text{m}$ 过程中,电场重新分布且仍关于 y 轴对称,细胞表面电场强度随距离的增加而增大, E_{max} 从 $1\text{ }347.7\text{ V/m}$ 增加至 $1\text{ }354.1\text{ V/m}$, E_{min} 从 697.9 V/m 增加至 810.5 V/m ,这是由于当细胞间距离

变大时,各个细胞之间相互影响减弱,可以预测当细胞间距离达到某个值时,细胞空间电场分布会与单个细胞空间电场分布相同,多细胞与电场相互作用的相关问题可以被简化为单细胞处理。

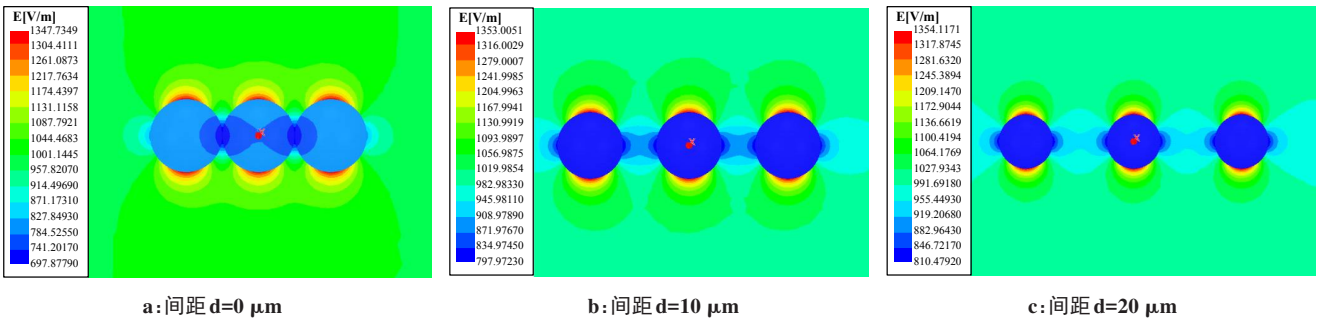


图 13 电场分布云图与细胞间距离的关系

Fig.13 Relationship between electric field distribution nephogram and cell spacing

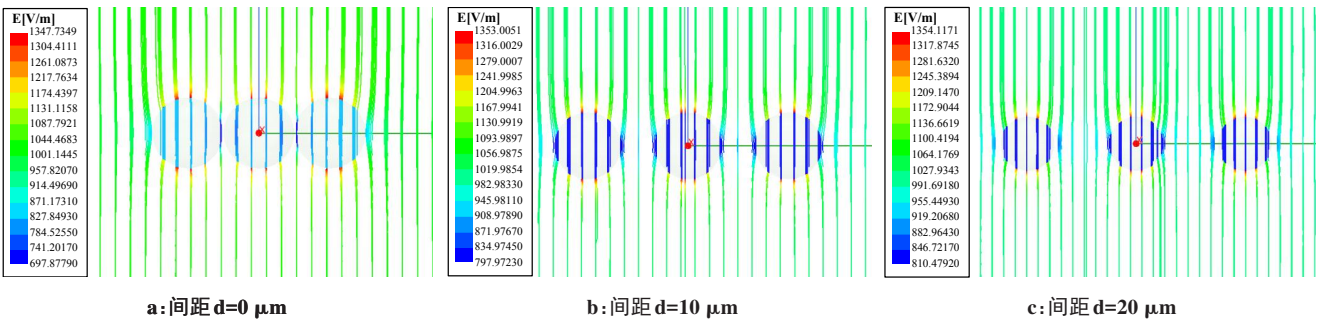


图 14 细胞空间电场线分布与细胞间距离的关系

Fig.14 Relationship between electric field lines distribution and cell spacing

3.3.2 间距对细胞膜上电场应力分布的影响分析 图 15a~图 15c 分别给出 3 个细胞间距 d 为 0 、 10 、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时细胞表面力密度分布图。对比图 15a~图 15c 发现,细胞表面力密度分布关于 y 轴对称,细胞 2 表面力密度在 180° 至 360° (0° 至 180°) 内的分布与细胞 3 在 0°

至 180° (180° 至 360°) 内的分布情况相同。体现在细胞 2、3 有形变为一侧内凹的椭球的趋势,细胞 1 有形变为椭球的趋势。随着细胞之间距离的增大,细胞之间力的相互影响减弱,各个细胞都有形变为椭球的趋势。

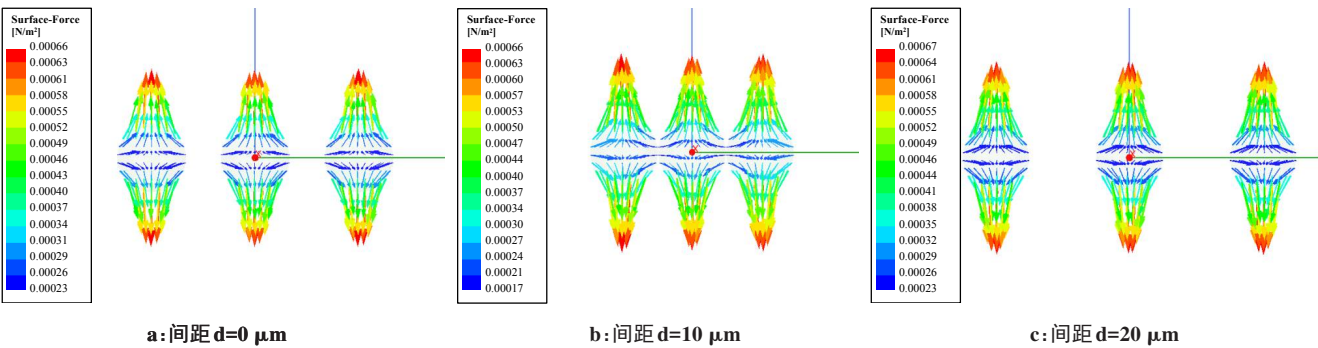


图 15 细胞表面力密度分布

Fig.15 Distribution of the surface force density of cells

图 16a~图 16c 分别给出细胞 1、2、3 之间距离为 0 、 10 、 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时细胞 2、细胞 3、细胞 1 所受法向电场应力随极角的变化关系 data1、data2、data3。图 16a~图

16c 显示,细胞 2、3 表面法向电场应力绝对值随细胞之间距离的增大而增大,细胞 1 表面法向电场应力几乎不随距离变化。

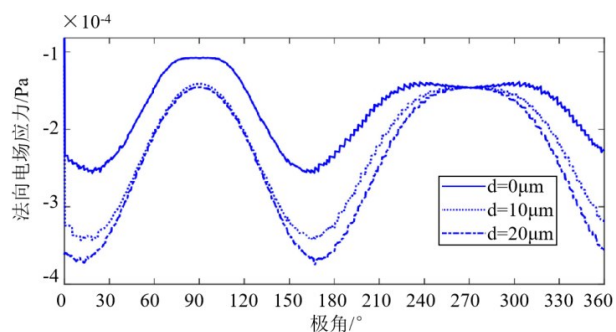
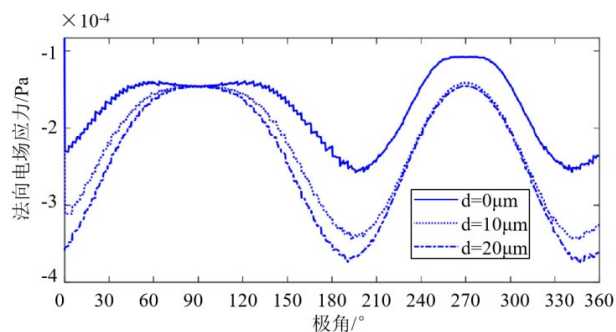
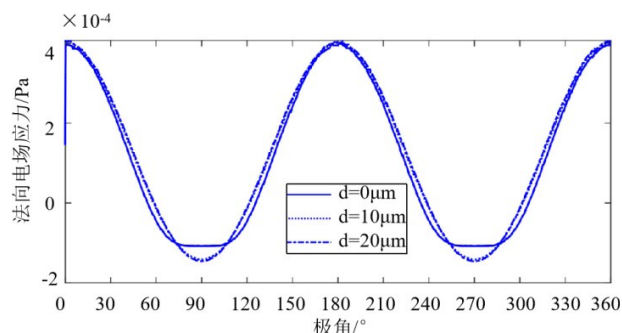
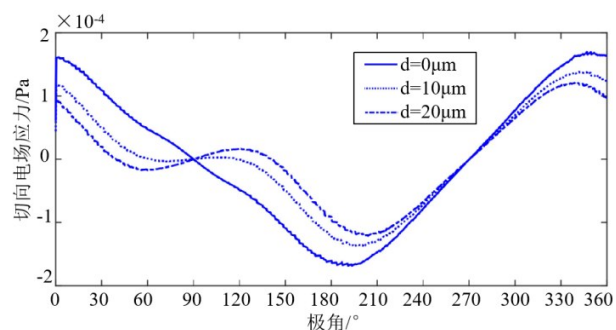
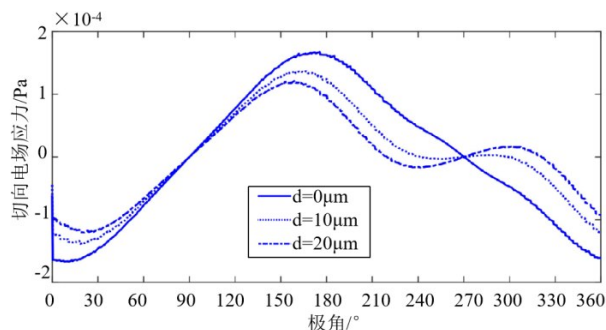
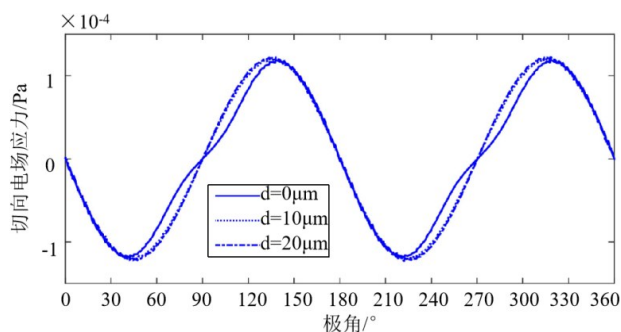
a: 细胞2 P_r 随极角变化关系b: 细胞3 P_r 随极角变化关系c: 细胞1 P_r 随极角变化关系图16 法向电场应力 P_r 与细胞间距离的关系Fig.16 Relationship between normal electric field stress P_r and cell spacing

图17a~图17c分别给出细胞1、2、3之间距离为0、10、20 μm 时细胞2、细胞3、细胞1所受切向电场应力随极角的变化关系 data1、data2、data3。图17a~图

17c显示,细胞2、3表面的切向电场应力绝对值随着细胞之间距离的增大而减小,细胞1表面切向电场应力几乎不随距离变化。

a: 细胞2 P_t 随极角变化关系b: 细胞3 P_t 随极角变化关系c: 细胞1 P_t 随极角变化关系图17 切向电场应力 P_t 与细胞间距离的关系Fig.17 Relationship between tangent electric field stress P_t and cell spacing

细胞之间的距离对细胞2、3外侧(细胞2膜上180°至360°范围和细胞3表面上0°至180°范围)的法向、切向电场应力影响极小。细胞2表面的法向、切

向电场应力在 $\theta=270^\circ$ 位置处和细胞3表面在 $\theta=90^\circ$ 位置处的法向、切向电场应力大小相等,此位置处法向、切向电场应力的大小与细胞之间距离无关。在

法向电场应力的作用下细胞1、2、3都有形变为椭球的趋势,细胞2、3形变程度相同;在切向电场应力的作用下细胞2、3有旋转的趋势。

图18a~图18c分别显示细胞1、2、3之间距离为0、10、20 μm时细胞2、细胞3、细胞1所受电场应力随极角的变化关系 data1、data2、data3。图18a~图18c显

示,距离不影响细胞电场应力随极角变化趋势,电场应力最大值(P_{\max})随细胞间距的增大而增大,在细胞间距相同的情况下细胞2、3电场应力最大值(P_{\max})相等。细胞相切位置处电场应力相等并且达到极小值,这个值不随细胞间距离的变化而变化。

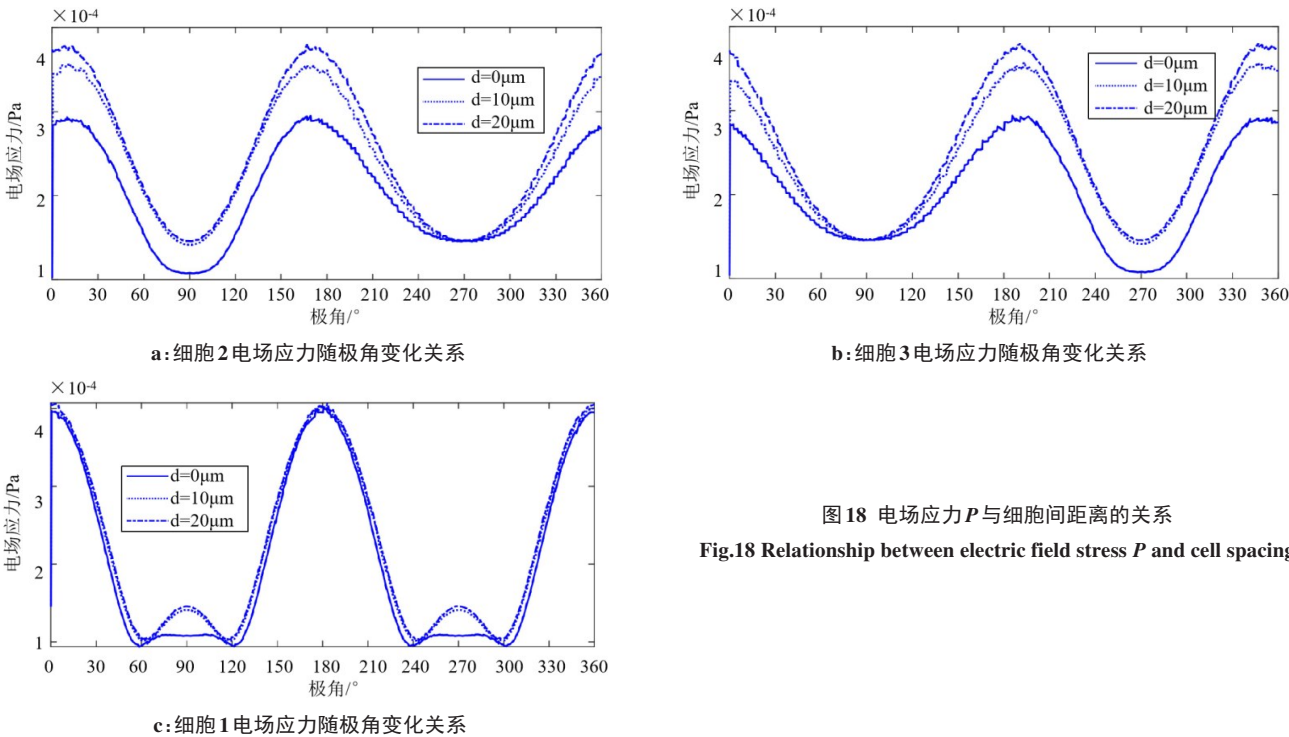


图18 电场应力 P 与细胞间距离的关系
Fig.18 Relationship between electric field stress P and cell spacing

结论(3):3个细胞与电场相互作用时,各细胞之间的距离会影响细胞表面电场应力的大小,从而影响细胞的形变程度。当细胞间距较小时,各细胞间的相互影响较强,左右两细胞形变程度相同,中间细胞形变为椭球;当细胞间距足够大时,细胞之间相互影响变得非常小,3个细胞都将在法向电场应力作用下形变为椭球,在切向电场应力的作用下旋转。

4 结 论

研究细胞表面所受电场应力分布可以探究电场作用下细胞发生形变、旋转、融合等现象的物理原因,也可以为生物电磁学的实际应用、电离辐射的卫生标准提供理论依据。本文采用麦克斯韦应力分析法,利用解析和数值分析方法分析了电场作用下细胞表面电场应力的分布情况。

通过分析得出结论:(1)单个细胞与电场相互作用时,细胞有从球形变为椭球形的趋势;(2)对于电场与多细胞系统相互作用,一定距离范围内细胞数目对细胞所受电场应力有一定影响,从而影响细胞的形变程度;当细胞间距足够大时,可忽略细胞间相

互影响,问题简化为单细胞与电场相互作用。
本文讨论了分布在同一条直线上球形细胞在电场作用下的受力情况,但在生物体中,细胞的形态、数目、空间排列方式各不相同,所以考虑细胞的形状、膜的各向异性以及细胞的空间排列对细胞膜电场应力的影响将是今后的研究方向。

【参考文献】

[1] 徐寅,李新平,区家源,等. 低频电磁场生物效应在毛发生长中研究进展[J]. 实用医学杂志, 2020, 36(11): 132-136.
XU Y, LI X P, QU J Y, et al. Advances in the study of biological effects of low frequency electromagnetic fields on hair growth[J]. Journal of Practical Medicine, 2020, 36(11): 132-136.
[2] 付小苒. 电磁场对生物体细胞影响机理的理论分析及建模[D]. 昆明: 云南师范大学, 2009.
FU X R. Theoretical analysis and modeling of the influence mechanism of electromagnetic field on biological cells [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2009.
[3] 余争平,张蕾. 太赫兹辐射生物效应研究进展与展望[J]. 第三军医大学学报, 2020, 43(23): 2259-2266.
YU Z P, ZHANG L. Progress and prospective in biological effects of terahertz radiation[J]. Journal of Third Military Medical University, 2020, 43(23): 2259-2266.
[4] 刘义保,陈树德,陈家森. 电磁场对细胞的作用[J]. 自然杂志, 1998, 21(2): 88-91.
LIU Y B, CHEN S D, CHEN J S. The action of the electromagnetic fields on the cells[J]. Nature Journal, 1998, 21(2): 88-91.

- [5] 谭言飞. 脉冲电场对细胞电穿孔的研究[D]. 成都: 四川大学, 2001.
TAN Y F. Effects of electromagnetic pulse field on cell electroporation [D]. Chengdu: Sichuan University, 2001.
- [6] BRYANT G, WOLFE J. Electromechanical stresses produced in the plasma membranes of suspended cells by applied electric fields[J]. J Membrane Biol, 1987, 96(2): 129-139.
- [7] ZIMMERMANN U. Electric field-mediated fusion and related electrical phenomena[J]. Biochim Biophys Acta, 1982, 694(3): 227-277.
- [8] ZHANG L. Electroporation and electrofusion in cell biology[J]. Bioelectrochem Bioenerg, 1991, 26(2): 376-377.
- [9] SCHWAN H P. Nonthermal cellular effects of electromagnetic fields AC-field induced ponderomotive forces[J]. Br J Cancer Suppl, 1982, 5(2): 220-224.
- [10] 武瑞青, 张辉. 球形细胞膜上电应力的计算[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(2): 249-253.
WU R Q, ZHANG H. Calculation of electric field stress on spherical cell membrane[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(2): 249-253.
- [11] SCHWAN H P. Electrical properties of tissue and cell suspensions[J]. Adv Biol Med Phys, 1957, 5: 147-209.
- [12] FRIESKE H, MAHNIG M. Elastic properties of lipid bilayers: theory and possible experiments[J]. Z Naturforsch C, 1973, 28(11-12): 693-703.
- [13] HELFRICH W. Deformation of lipid bilayer spheres by electric fields [J]. Z Naturforsch C, 1974, 29(3-4): 182-183.
- [14] HYUGA H, JR K K, WAKABAYASHI N. Steady-state deformation of a vesicle in alternating electric fields[J]. Bioelectrochem Bioenerg, 1993, 32(1): 15-25.
- [15] 牛中奇. 细胞膜上的自电场应力[J] 中国生物医学工程学报, 1994, 13(1): 90-95.
NIU Z Q. Self-electric field stress on cell membrane[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 1994, 13(1): 90-95.
- [16] 邹萍. 外电场中两等径导体球间的相互作用力与局域场研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
ZOU P. Research on interaction forces and local field of two equal size conducting spheres in the electric field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [17] 李缉熙, 牛中奇. 生物电磁学概论[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1990: 18-38.
LI J X, NIU Z Q. Introduction to bioelectromagnetics[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Technology Press, 1990: 18-38.
- [18] 庞小峰. 生物电磁学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 11-115.
PANG X F. Bioelectromagnetics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 11-115.
- [19] 赵灿星. 双层椭球的等效介电常数的分析及相关人工电磁材料的设计[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
ZHAO C X. Analysis of equivalent dielectric constant of double-layer ellipsoid and design of related artificial electromagnetic Materials[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [20] ZHANG H, WANG L Y, ZHANG P J, et al. Estimation of biophysical properties of cell exposed to electric field[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(3): 629-637.
- [21] 张丽, 朱晓璐, 倪中华. 应用于类球体细胞电旋转分析中的介电参数求解算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(2): 280-285.
ZHANG L, ZHU X L, NI Z H. Application of dielectric parameter solving algorithm in the analysis of celestial cell Electrorotation[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(2): 280-285.

(编辑: 陈丽霞)