

# 鸟类铁矿物磁受体中磁赤铁矿片晶链的微磁学分析\*

张溪超 赵国平<sup>†</sup> 夏静

(四川师范大学物理与电子工程学院, 成都 610068)

(2013年6月29日收到; 2013年7月30日收到修改稿)

实验表明, 自然界中许多动物能感受到磁场信息, 尤其是鸟类能够依靠地磁信息导航归巢或迁徙. 鸟类磁感受机理认为, 鸟类可以通过感受地磁场的强度与倾角建立磁地图从而进行飞行导航. 目前对鸟类用于感受磁场的磁受体的研究仍然处于探索鉴定阶段, 研究铁矿物结构是否具有在生命系统中作为磁受体的物理磁学性质有着十分重要的意义. 本文使用微磁学方法对鸟类基于铁矿物的磁感受机理中的磁赤铁矿片晶状磁受体结构进行三维模拟分析, 对其在地磁场中的畴态及对磁场信息的响应作用进行探究. 结果表明, 自然畴态为涡旋态的磁赤铁矿片晶链具有感受地磁场方向变化的能力.

**关键词:** 鸟类定向与导航, 铁矿物磁感受机理, 微磁学

**PACS:** 87.19.-j, 91.25.Wb, 75.50.Gg, 75.60.Ch **DOI:** 10.7498/aps.62.218702

## 1 引言

自然界中许多种动物的行为表明其能够感受到磁场信息, 其中多种动物的磁感受能力已得到了行为学实验的证明<sup>[1-8]</sup>. 其磁感受机理一直是生命科学等相关领域的研究热点, 尤其是鸟类依靠地磁场信息进行飞行导航的能力一直吸引着不少科学工作者进行不断的探索研究.

目前, 对于鸟类磁感受已有三种物理模型和机理被提出, 即位于鸟类喙部上端基于铁矿物的磁受体机理 (iron-mineral-based magnetoreceptor mechanism in the upper beak)<sup>[9-17]</sup>, 位于鸟类视网膜的化学磁受体机理 (chemical magnetoreceptor mechanism in the retina)<sup>[16,18]</sup> 和最新提出的鸟类内耳磁受体 (inner ear magnetoreceptor)<sup>[19-21]</sup>. 其中, 前两种机理在近几十年内都得到了来自行为学实验<sup>[7,22]</sup>, 生理学实验<sup>[7,23,24]</sup> 和组织学实验<sup>[14,25-29]</sup> 的越来越多的支持. 有研究认为这两种鸟类磁感受机理可同时存在于鸟类体内, 对鸟类磁感受导航起作用<sup>[30]</sup>. 更有研究指出, 在夜间迁徙的鸟类主要依靠

感受地磁场信息进行导航<sup>[31]</sup>. 虽然这项研究的结果还存有一定争议<sup>[32]</sup>, 但能肯定的是, 地磁场一定是鸟类飞行导航中依赖的一项重要信息源.

鸟类基于铁矿物的磁感受机理在最近几年得到了 Fleissner 等<sup>[14,25-27,29]</sup> 实验结果的有力支持. Fleissner 等人在信鸽 (*columba livia*) 喙的上端部分发现了微小的磁性颗粒结构, 并随后在其他一些鸟类中发现了同样的结构<sup>[33]</sup>. 在进一步的研究中, Fleissner 等人确定了这种微小磁性颗粒结构包含两种铁磁材料<sup>[25-27]</sup>: 一种是磁铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), 另一种是磁赤铁矿 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). 其中, 磁铁矿形成微团簇颗粒并吸附于细胞膜, 而磁赤铁矿则成片晶状结构并排成链 (片晶链) 位于神经树突内<sup>[14,16]</sup>, 如图 1 所示. 基于铁矿物的磁感受机理认为, 当这些铁矿物结构在受地磁场作用时, 会响应地磁场而发生结构形变, 从而导致细胞膜上离子通道的开放, 影响细胞内外的离子浓度, 进而形成和调节膜电位. 神经系统则通过检测这种由地磁场变化导致的细胞膜电位变化, 从而识别地磁场信息<sup>[14,16,26]</sup>.

然而, Keays 等<sup>[34]</sup> 最近发表的一项研究表示, 信鸽喙的上端部分中的富铁细胞团簇并不是磁感

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11074179)、四川高校科研创新团队建设计划 (批准号: 12TD008) 和四川师范大学学生科研创新项目基金资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhaogp@uestc.edu.cn; zapple2004@yahoo.com

受神经元, 而是巨噬细胞. 但其研究还不能排除铁矿物磁受体分布在喙的上端部分中的可能<sup>[35]</sup>, 并不能否定先前提出的基于铁矿物的磁感受机理. 其研究最终指出, 通过三叉神经向脑部传递磁感受信号的磁受体仍有待发现, 需进一步研究含铁矿结构是否具有在生命系统中作为磁受体所需的物理磁学性质.

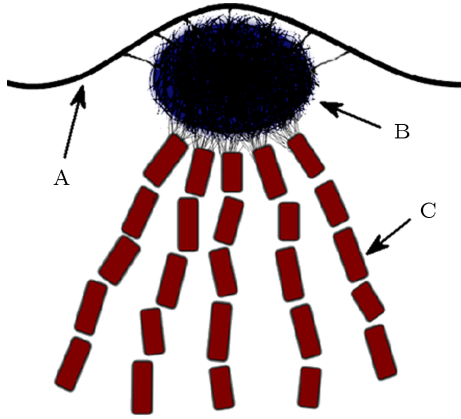


图1 信鸽喙内铁矿物磁受体结构示意图 (A) 细胞膜; (B) 磁铁矿微团簇颗粒; (C) 磁赤铁矿片晶链

因此, 相比越来越多针对基于铁矿物的磁感受机理磁受体的实验研究, 对磁受体结构磁学性质的研究显然较少. 毋庸置疑, 了解清楚磁受体结构的磁学性质在对磁感受机理的探索中有着十分重要的意义. 本文运用微磁学理论方法, 对基于铁矿物的磁感受机理中的磁受体核心结构, 即磁赤铁矿片晶链, 进行三维模拟分析, 探索磁赤铁矿片晶链在地磁场中的磁化强度, 畴态和能量等特征, 对磁赤铁矿片晶链在地磁场中的物理响应给出定量分析.

## 2 微磁学理论与计算模型

本文对磁受体结构的计算由微磁学模拟软件OOMMF<sup>[36]</sup>实现, 其对系统磁矩时间演化过程及平衡态下磁矩状态的求解基于Landau-Lifshitz常微分方程<sup>[37-43]</sup>:

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -|\tilde{\gamma}|\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} - \frac{|\tilde{\gamma}|\alpha}{M_s} \mathbf{M} \times (\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}), \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{M}$  和  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  分别表示材料中的磁矩和有效外场,  $\tilde{\gamma}$  是Landau-Lifshitz旋磁比,  $\alpha$  为阻尼系数. Landau-Lifshitz方程的Gilbert形式是<sup>[44]</sup>

$$\frac{d\mathbf{M}}{dt} = -|\gamma|\mathbf{M} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\alpha}{M_s} \left( \mathbf{M} \times \frac{d\mathbf{M}}{dt} \right), \quad (2)$$

式中,  $\gamma$  是Gilbert旋磁比, 其在数学上可通过关系  $\gamma = (1 + \alpha^2)\tilde{\gamma}$  与Landau-Lifshitz旋磁比相互转化. 系统的弛豫时间依赖于阻尼系数  $\alpha$ ,  $\alpha$  实验值一般处于0.01至0.1之间. 但因其大小不会影响系统的平衡态, 且本文更关注系统弛豫后的结构, 所以本文计算中均取  $\alpha$  为0.5以缩短计算时间. 同时,  $\gamma$  的取值为默认值  $2.211 \times 10^5$ .

有效场  $\mathbf{H}_{\text{eff}}$  的定义为

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = -\mu_0^{-1} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{M}}, \quad (3)$$

其中, 平均能量密度  $E$  是关于  $\mathbf{M}$  的函数, 由Brown方程确定<sup>[45]</sup>:

$$E = A(r) \left[ \frac{\nabla \mathbf{M}}{M_s} \right]^2 - K(r) \frac{(\mathbf{M} \cdot \mathbf{n})^2}{M_s^2} - \mu_0 \mathbf{M} \cdot \mathbf{H} - \frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{H}_d(r) \cdot \mathbf{M}, \quad (4)$$

公式中  $A$  和  $K$  分别为交换常数和各向异性常数.  $\mathbf{H}$  和  $\mathbf{H}_d(r)$  为外场和退磁场, 而  $M_s = |\mathbf{M}(r)|$  为自发磁化强度. 方程右边四项分别对应交换能, 各项异性性能, 外场能 (Zeeman 能) 和静磁能 (退磁能).

根据铁矿物磁感受机理磁受体中磁赤铁矿片晶链结构的实验观察结果<sup>[26,27,46]</sup> 本文建立如图2所示计算模型, 采用自由边界条件.

图2中, 每块磁赤铁矿片晶的长宽为  $\Delta x$  和  $\Delta y$ , 厚度为  $\Delta z$ . 计算中约定  $\Delta x$  等于  $\Delta y$  并忽略片晶之间的距离, 链状结构总长  $L$  由磁赤铁矿片晶数  $N$  决定. 磁赤铁矿片晶链沿  $y$  轴正方向, 外磁场方向置于  $x$ - $y$  面内与  $y$  轴成  $\beta$  角. 依据已有实验数据<sup>[16,26,27,46]</sup>, 磁赤铁矿片晶长  $\Delta x$  宽  $\Delta y$  均设为  $1 \mu\text{m}$ , 厚度  $\Delta z$  设为  $0.1 \mu\text{m}$ , 其材料为顺磁性矿物——磁赤铁矿 ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), 磁性内禀参数见表1. 由于地磁场强度介于  $0.023 \text{ mT}$  与  $0.068 \text{ mT}$  之间<sup>[16,47]</sup>, 本文计算中磁场  $B_0$  取为  $0.05 \text{ mT}$  以模拟地磁场, 其方向在  $x$ - $y$  面内与  $y$  轴正方向的夹角  $\beta$  在  $0$  至  $90^\circ$  之间变化.

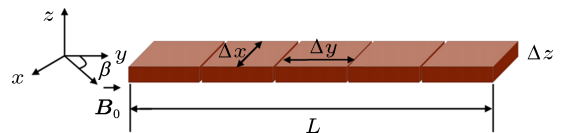


图2 计算模型

为了满足微磁学Brown方程的求解合理性<sup>[45,49]</sup>, 计算划分网格时需将模型划分为若干离散长度小于特征长度 (静磁交换长度与磁晶

交换长度)的晶胞,以保证微磁学计算中材料内相邻自旋间的夹角最大值低于  $30^\circ$  以及材料连续性的基本假设,从而保证计算结果的正确性与可靠性.根据材料内禀参数可知,磁赤铁矿磁晶交换长度为  $52.6\text{ nm}$ ,静磁交换长度为  $12.1\text{ nm}$ .因此,在保证计算结果正确性的原则上,本文确定了两种合理的网格划分规格,即将模型均匀划分为若干  $10\text{ nm} \times 10\text{ nm} \times 10\text{ nm}$  的晶胞或  $20\text{ nm} \times 20\text{ nm} \times 20\text{ nm}$  的晶胞.通过对比分析,两种规格网格划分情况下的计算结果均正确合理.

如图 3 所示,对于计算中磁赤铁矿片晶内磁

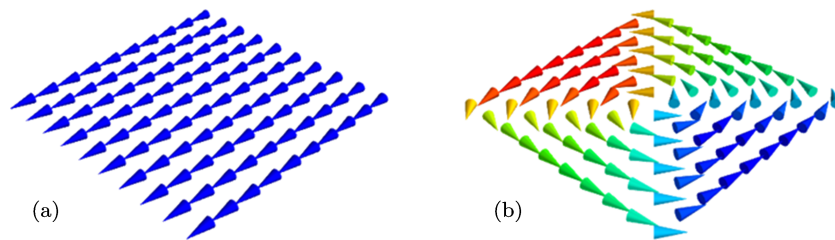


图 3 磁赤铁矿片晶初始畴态示意图(圆锥尖表示磁矩方向) (a) 单畴态; (b) 涡旋态

### 3 计算结果与讨论

如图 4 所示,初始畴态为涡旋态的磁赤铁矿片晶链在地磁场中弛豫平衡后,其总能量与组成片晶链的片晶数  $N$  成正比.每增加 1 块磁赤铁矿片晶,片晶链总能量约增加  $0.95\text{ keV}$ .同时,涡旋态的磁赤铁矿片晶链总能量均不随地磁场与片晶排向方向( $y$ 轴正方向)夹角  $\beta$  变化而变化.而对于初始畴态为单畴态的磁赤铁矿片晶链,其总能量也随组成片晶链的片晶数  $N$  增加而增加,最终趋于  $4.4\text{ keV}$ ,但每条片晶链的总能量在地磁场与链条方向成一定夹角时均有下降.其中,对于片晶数  $N$  大于 5 的片晶链的总能量在随地磁场与链条方向夹角  $\beta$  变大而减小到一定值后又缓慢增大.从图 4 右部分可以看到,对于单独一个初始状态为单畴态的磁赤铁矿片晶,其总能量在地磁场与  $y$  轴正方向成一定夹角时显著降低.这是因为初始单畴态约定磁矩指向  $y$  轴正方向,当地磁场与  $y$  轴正方向夹角  $\beta$  增加时,该片晶内单畴态便演化为涡旋态,可见图 7,能量迅速降低.

此外,从图 4 中还可发现,初始畴态为涡旋态的片晶链的总能量随着片晶数  $N$  的增大呈线性增大,而初始畴态为单畴态的片晶链总能量则随着  $N$

矩分布的初始状态,本文给予两种不同的考虑,即考虑两种不同的初始畴态:一种是沿  $y$  轴正方向的单畴态 (single domain),另一种是涡旋态 (vortex domain).这两种畴态均有可能在生物磁性结构中出现 [46].

表 1 计算中磁赤铁矿  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  的磁性内禀参数 [27,48]

$M_s/(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$	$3.75 \times 10^5$
$K/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$	$4.70 \times 10^3$ (Cubic)
$A/(\text{J}\cdot\text{m}^{-1})$	$1.30 \times 10^{-11}$
$\sqrt{A/K}/\text{nm}$	52.6
$\sqrt{2A/\mu_0 M_s^2}/\text{nm}$	12.1

的增加呈非线性变化,这是两种不同畴态的磁矩分布特点导致的.当片晶数  $N$  增加时,涡旋态中的磁矩分布随  $N$  的变化并不敏感,各块片晶中的磁矩分布基本相同(见图 6).因此,初始畴态为涡旋态的各块片晶的总能量基本相等,片晶链的总能量随着  $N$  增加呈线性变化.而在初始畴态为单畴态的片晶链中,磁矩主体沿链条排向一致取向,如图 7 所示,其交换作用能,外场能和磁晶各向异性性能几乎为 0,片晶链的总能量主要为退磁能,由首尾两端的小磁畴贡献.当片晶数  $N$  增加时,片晶链首尾两端的小磁畴在片晶链中的比重将减小.当  $\beta = 0^\circ$  时,片晶链首尾两端的小磁畴磁矩分布对  $N$  的变化并不敏感,片晶链总能量随  $N$  变化不大.当  $\beta$  较大时,片晶链的畴态从  $N = 1$  到  $N = 2$  有一个较大的变化,对应的总能量也有一个较大变化.当  $N > 2$  时,畴态基本不随  $N$  变化,片晶链的总能量变化也不大.总体上,初始畴态为单畴态的片晶的总能量(主要为退磁能)随着  $N$  的增加呈非线性变化,如图 4 所示.

图 5 显示磁赤铁矿片晶链在地磁场中的相对磁化强度随地磁场与片晶链夹角  $\beta$  的变化关系.可以看到,当  $\beta$  角增加时,初始畴态为涡旋态的片晶链在  $x$  方向的相对磁化强度有微弱的增加,而其  $y$  方向的相对磁化强度则显著减小.同时,随片晶链

片晶数  $N$  的增加,  $y$  方向相对磁化强度的减小趋势愈加明显. 由此可知, 初始畴态为涡旋态的片晶链在  $y$  方向, 即片晶排向方向的磁化强度能响应地磁场的角度变化. 也就是说, 该磁赤铁矿片晶链结构能感受地磁场与片晶链方向夹角  $\beta$  于  $0^\circ$  至  $90^\circ$  间的角度变化, 同时以其自身磁化强度的变化做为响应信号. 对于初始畴态为涡旋态和单畴态的磁赤铁矿片晶链在  $z$  方向的相对磁化强度均约等于 0, 并不随  $\beta$  角的变化而变化, 无分析必要. 图 5 中仅给出磁赤铁矿片晶链在  $x$  方向和  $y$  方向的相对磁化强度.

对于初始畴态为单畴态的磁赤铁矿片晶链, 当  $\beta$  角增加时, 其在  $x$  方向或  $y$  方向的相对磁化强度均由 0 或 1 变化到一定值并保持不变. 该变化规律反应出以单畴态为初始畴态的磁赤铁矿片晶链虽然能响应地磁场与片晶链夹角  $\beta$  的变化, 但对  $\beta$  角变化的程度不能以相对磁化强度的变化作出响应.

图 6 与图 7 分别显示初始畴态为涡旋态和单畴态的磁赤铁矿片晶链在地磁场中平衡时的磁畴分布 ( $N = 1, 2, 3, 7$ ).  $\beta$  角为  $0^\circ$  时, 地磁场方向为  $y$  轴正向, 即平行于片晶排向.  $\beta$  角为  $90^\circ$  时, 地磁场方向为  $z$  轴正向, 即垂直于片晶排向.

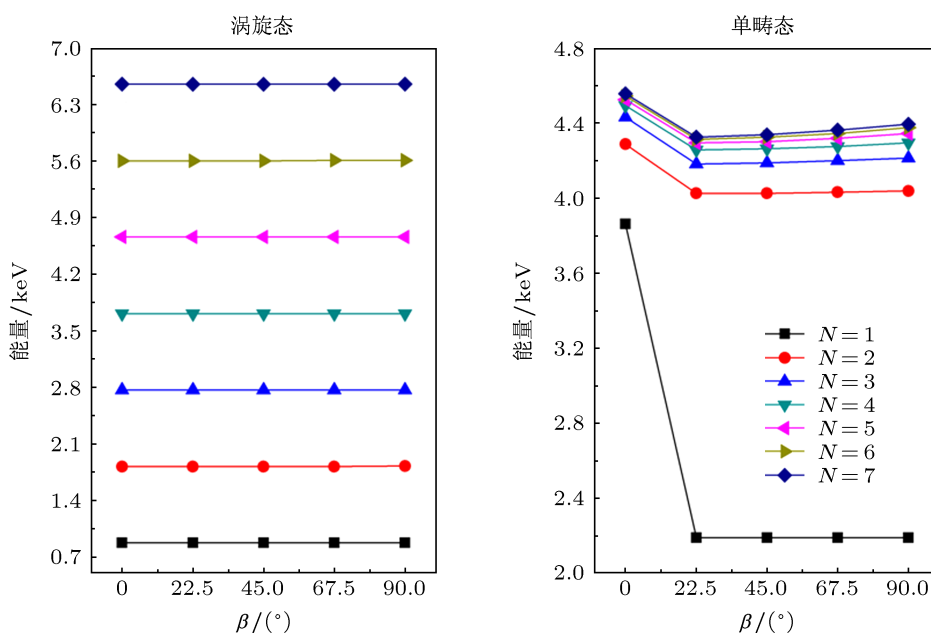


图 4 磁赤铁矿片晶链总能量随  $\beta$  角变化关系

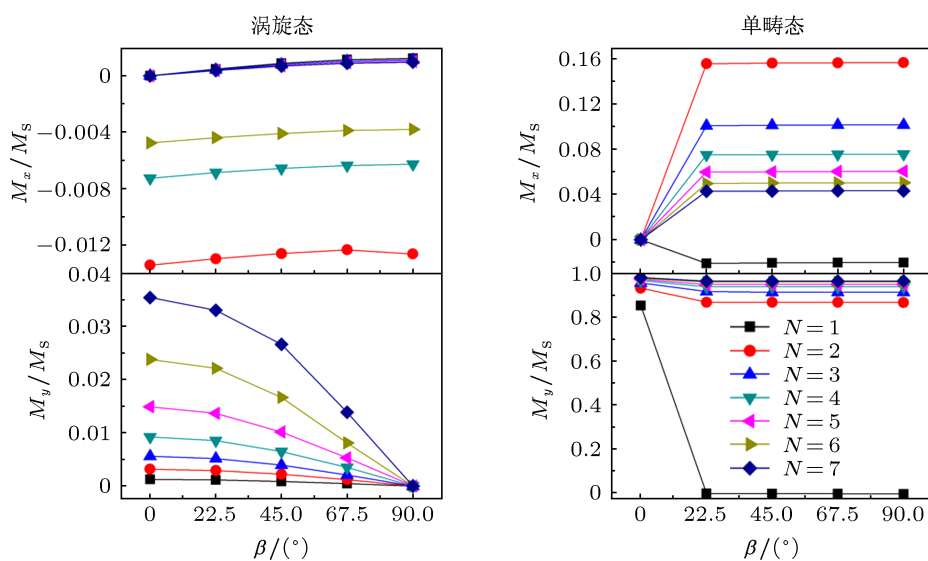


图 5 磁赤铁矿片晶链的相对磁化强度随  $\beta$  角变化关系



如图 6 所示, 对于初始畴态为涡旋态的磁赤铁矿片晶链, 其畴态分布随地磁场与片晶排向夹角  $\beta$  的变化并不明显, 表明地磁场方向与磁赤铁矿片晶排向的夹角变化不会改变片晶链内的畴态. 在图 7 中, 对于初始畴态为单畴态的磁赤铁矿片晶链, 地磁场方向与片晶排向夹角  $\beta$  的变化使得单块片晶的畴态改变为涡旋态. 对于片晶数  $N$  大于 2 的片晶链,  $\beta$  的变化则将其首尾两端的磁矩趋向地磁场方向. 由此可知, 对于单块存在的磁赤铁矿片晶, 单畴态是不稳定的, 其自然情况下应为涡旋态. 结合图 4 能量分析, 单块存在的磁赤铁矿片晶在涡旋态下的

能量也明显小于单畴态的能量, 故其涡旋态结构稳定性显然比单畴态更强. 同理, 排除单块存在的磁赤铁矿片晶为单畴态的情况, 对于片晶数  $N$  介于 1 至 4 间的磁赤铁矿片晶链, 其自然畴态为涡旋态时结构能量相比单畴态更低, 而对于片晶数  $N$  大于 4 的磁赤铁矿片晶链, 其自然畴态为单畴态时结构能量相比涡旋态更低. 原则上, 畴态应趋于能量更低的构型, 但基于自然畴态为涡旋态的磁赤铁矿片晶链具有响应地磁场方向变化的能力, 可知基于铁矿物磁受体中的磁赤铁矿片晶链结构的自然畴态应为涡旋畴态.

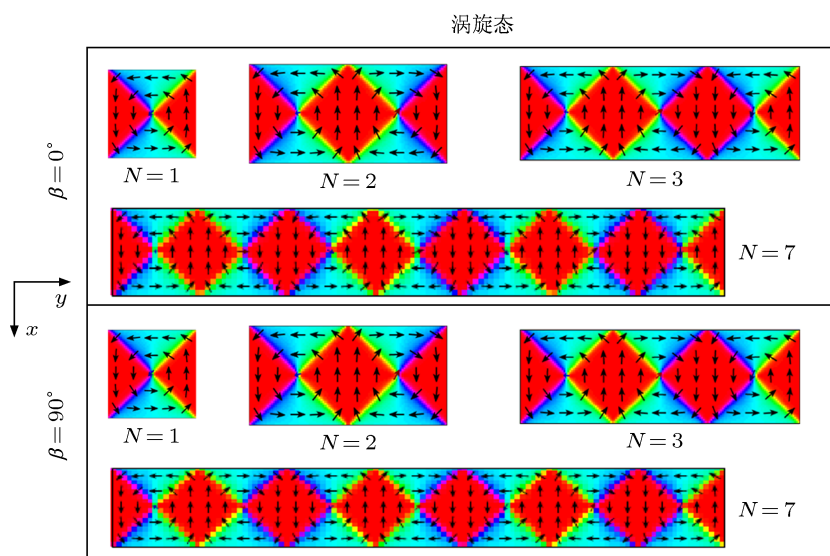


图 6 涡旋态磁赤铁矿片晶链弛豫后磁畴分布

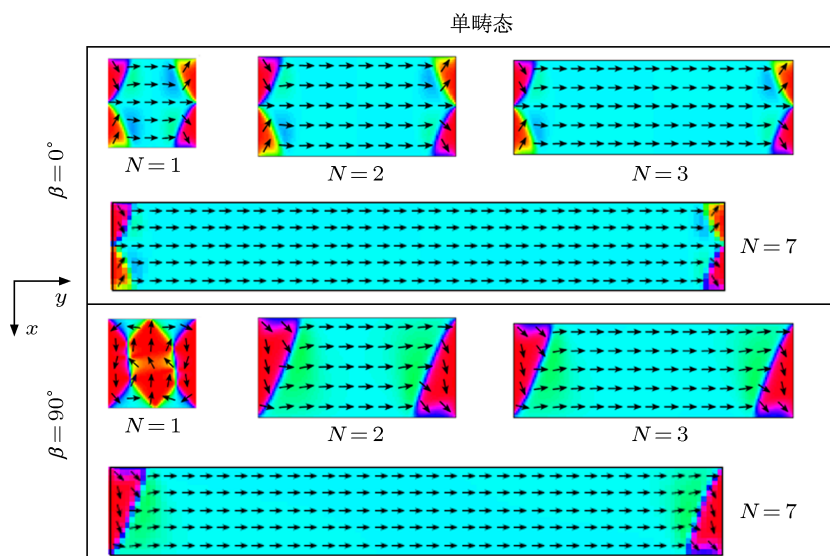


图 7 单畴态磁赤铁矿片晶链弛豫后磁畴分布

另外值得一提的是, 本文计算中忽略了片晶之间的空隙. 实际上, 对于初始畴态为单畴态的片晶链而言, 片晶间的空隙将导致表面磁荷的存在, 使得退磁能增加, 从而导致总能量增加. 考虑到片晶间隙较小, 这个影响并不大. 对于初始畴态为涡旋态的磁赤铁矿片晶链, 相邻片晶中涡旋态具有相反闭合绕行分布, 如图 6 所示. 因此, 若考虑片晶之间空隙, 其空隙处左右磁矩将平行于表面呈相同取向, 不会产生表面磁荷. 但由于每块片晶之间的距离因空隙的存在而增加, 它们之间的交换作用会减弱, 因此片晶链的交换作用能将减小, 使得片晶链总能量相比没有空隙时有微弱的减小. 总的来说, 片晶空隙会导致单畴态的能量增加, 涡旋态能量减小.

## 4 结论

通过对鸟类基于铁矿物的磁感受机理中磁受体的磁赤铁矿片晶链结构进行微磁学计算模拟分析可知, 磁赤铁矿片晶链结构的自然畴态极大可能

为涡旋态. 在该畴态下, 沿片晶排向的磁化强度能明显地响应地磁场方向与片晶链结构夹角的变化. 结合基于铁矿物的磁感受机理原理, 可以推测, 正是由于涡旋态磁赤铁矿片晶链与地磁场方向夹角的变化, 引起沿片晶排向的磁化强度显著变化, 同磁铁矿微团簇相作用, 从而控制细胞膜离子通道的开放, 进而导致跨膜电荷的移动, 使得细胞膜电位变化. 神经系统通过检测这种电位变化, 从而使鸟类感知地磁场方向的变化. 即鸟类在飞行中, 可依靠自然畴态为涡旋态的磁赤铁矿片晶链结构感受飞行方向与地磁场方向的夹角变化.

综上所述, 本文通过微磁学分析, 证明了具有涡旋态结构的磁赤铁矿片晶链在鸟类基于铁矿物的磁感受机理磁受体模型中具有响应地磁场方向变化的作用, 其在整个鸟类基于铁矿物的磁感受机理中具有重要的作用. 对该磁受体片晶链结构在更加复杂变化的地磁场中的磁学研究, 将对深入理解鸟类磁感受机理有十分重要的意义.

- [1] Lohmann K, Cain S, Dodge S, Lohmann C 2001 *Science* **294** 364
- [2] Lohmann K, Lohmann C, Erhart L, Bagley D, Swing T 2004 *Nature* **428** 909
- [3] Philip J, Freake M, Borland S 2002 *J. Comp. Physiol.* **188** 157
- [4] Philip J, Borland S 1992 *Nature* **359** 142
- [5] Liu X F, Shi Y 2009 *Acta Biophys. Sin.* **25** 247 (in Chinese) [刘小峰, 史远 2009 生物物理学报 **25** 247]
- [6] Pan Y X, Zhu R X 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 1335 (in Chinese) [潘永信, 朱日祥 2011 科学通报 **56** 1335]
- [7] Wiltshcko R, Wiltshcko W 2006 *Bioessays* **28** 157
- [8] Lohmann J, Johnson S 2000 *Trends Neurosci.* **23** 153
- [9] Beason R C, Nichols J E 1984 *Nature* **309** 151
- [10] Beason R C, Dussourd N, Deutschlander M E 1995 *J. Exp. Biol.* **198** 141
- [11] Munro U, Munro J, Phillips J 1997 *Naturwissenschaften* **84** 26
- [12] Hanzlik M, Heunemann C, Holtkamp-Rotzler E, Winklhofer M, Petersen N, Fleisner G 2000 *BioMetals* **13** 325
- [13] Davila A F, Winklhofer M, Shcherbakov V P, Petersen N 2005 *Biophys. J.* **89** 56
- [14] Fleissner G, Holtkamp-Rotzler E, Hanzlik M, Winklhofer M, Fleissner G, Petersen N, Wiltshcko W 2003 *J. Comp. Neurol.* **458** 350
- [15] Winklhofer M 2004 *Physik unserer Zeit.* **35** 120
- [16] Solov'yov I A 2008 *Ph. D. Dissertation* (Frankfurt am Main: Johann Wolfgang Goethe-University)
- [17] Kirschvink J L, Walker M M, Diebel C E 2001 *Curr. Opin. Neurobiol.* **11** 462
- [18] Johnsen S, Lohmann K J 2005 *Nat. Rev. Neurosci.* **6** 703
- [19] Winklhofer M 2012 *Science* **336** 991
- [20] Wu L Q, Dickman J D 2011 *Curr. Biol.* **21** 418
- [21] Wu L Q, Dickman J D 2012 *Science* **336** 1054
- [22] Wiltshcko W, Wiltshcko R, Munro U 2000 *Naturwissenschaften* **87** 366
- [23] Semm P, Demaine C 1986 *J. Comp. Physiol. A* **159** 619
- [24] Wiltshcko W, Wiltshcko R 2002 *Naturwissenschaften* **89** 445
- [25] Stahl B, Fleissner G, Falkenberg G, Fleissner G 2006 *Proceedings of the 4th all Conference on Metalloproteins and Metalloidproteins*, Herbert Utz Verlag, Munich, Germany, 2006 p63
- [26] Fleissner G, Stahl B, Thalau P, Falkenberg G, Fleissner G 2007 *Naturwissenschaften* **94** 631
- [27] Stahl B, Fleissner G, Falkenberg G, Fleissner G 2007 *Processing of the XAFS13* Stanford, California (USA), 2007 p755
- [28] Hanzlik M, Heunemann C, Holtkamp-Rotzler E, Winklhofer M, Petersen N, Fleisner G 2000 *BioMetals* **13** 325
- [29] Winklhofer M, Holtkamp-Rotzler E, Hanzlik M, Fleissner G, Petersen N 2001 *Europ. J. Mineral.* **13** 659
- [30] Wiltshcko W, Wiltshcko R 2007 *J. Ornithol.* **148** 61
- [31] Cochran B, Mouritsen H, Wikelski M 2004 *Science* **304** 405
- [32] Muheim R, Moore F R, Phillips J B 2006 *J. Exp. Biol.* **209** 2
- [33] Stahl B, Fleissner G, Falkenberg G, Fleissner G 2007 *DESY Annual Report* 1269
- [34] Treiber C D, Salzer M C, Riegler J, Edelman N, Sugar C, Breuss M, Pichler P, Cadiou H, Saunders M, Lythgoe M, Shaw J, Keays D A 2012 *Nature* **484** 367
- [35] O'Neill P 2013 *Develop. Growth Differ.* **55** 188
- [36] Donahue M J, Porter D G, OOMMF user's guide, version 1.0. NISTIR 6376, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (1999)
- [37] Landau L, Lifshitz E 1935 *Physik. Z. Sowjetunion* **8** 153
- [38] Wang Ying, Wang Rui, Xie Hai Long, Bai Jian Min, Wei Fu Lin 2013 *Chin. Phys. B* **22** 068506
- [39] Jiang J J, Yuan L, Deng L W, He H H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3043 (in Chinese) [江建军, 袁林, 邓联文, 何华辉 2006 物理学报 **55** 3043]

- [40] Yang X H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7279 (in Chinese) [杨秀会 2008 物理学报 **57** 7279]
- [41] Chen R J, Rong C B, Zhang H W, He S L, Zhang S Y, Shen B G 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4341 (in Chinese) [陈仁杰, 荣传兵, 张宏伟, 贺淑莉, 张绍英, 沈保根 2004 物理学报 **53** 4341]
- [42] Weng Z Z, Feng Q, Huang Z G, Du Y W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3177 (in Chinese) [翁臻臻, 冯倩, 黄志高, 都有为 2004 物理学报 **53** 3177]
- [43] Xiao J J, Sun C, Xue D S, Li F S 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1605 (in Chinese) [肖君军, 孙超, 薛德胜, 李发伸 2001 物理学报 **50** 1605]
- [44] Gilbert T L 1955 *Phys. Rev.* **100** 1243
- [45] Brown W F, Jr 1945 *Rev. Mod. Phys.* **17** 15
- [46] Solov'yov I A, Greiner W 2009 *Phys. Rev. E* **80** 041919
- [47] Bloxham J, Gubbins D 1989 *Sci. Am.* **261** 68
- [48] Hunt C, Moskowitz B, Banerjee S 1995 *Rock Physics and Phase Relations, A Handbook of Physical Constants, AGU Reference Shelf* **3** 189
- [49] Fischbacher T, Franchin M, Bordignon G, Fangohr H 2007 *IEEE Trans. Magn.* **43** 2896

# Micromagnetic analysis of the maghemite platelet chains in the iron-mineral-based magnetoreceptor of birds\*

Zhang Xi-Chao Zhao Guo-Ping<sup>†</sup> Xia Jing

(College of Physics and Electronic Engineering, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

(Received 29 June 2013; revised manuscript received 30 July 2013)

## Abstract

Experiments demonstrate that large varieties of animals have the ability to sense the magnetic field. Especially, some birds can use the geomagnetic field for navigation. According to the avian magnetoreception mechanisms, birds can build magnetic map for orientation and navigation by sensing the intensity and incline of geomagnetic field. However, researches on the magnetoreceptor of birds are still at the stage of discovery and identification, and it is necessary to study the iron-mineral-based structures to know whether they have the physical and magnetic properties to act as magnetoreceptor in living system. In this paper, the maghemite platelet chains in the iron-mineral-based magnetoreceptor have been studied with three-dimensional simulation based on the theories of micromagnetics. The reaction of the maghemite platelet chains with geomagnetic field has been investigated. Result indicates that the maghemite platelet chains with vortex domain can response to the change of the orientation of geomagnetic field.

**Keywords:** avian navigation, iron-mineral-based magnetoreception mechanism, micromagnetics

**PACS:** 87.19.-j, 91.25.Wb, 75.50.Gg, 75.60.Ch

**DOI:** 10.7498/aps.62.218702

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11074179), the financial support from Construction Plan for Scientific Research Innovation Teams of Universities in Sichuan Province, China (Grant No. 12TD008), and the Research Innovation Project for Students of Sichuan Normal University.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhaogp@uestc.edu.cn; zapple2004@yahoo.com