

文章编号: 0253-2239(2007)07-1239-6

# 生物球晶中双马尔特十字的形成机理\*

苏永道 梁伟 金卫东 张鸿栋 廖光熙

(济南大学理学院, 济南 250022)

**摘要:** 生物球晶属于溶致液晶,大量存在于动、植物体中,例如脑、神经、肌肉、血液、胆汁等与生命密切相关的主要组织中。对鸡胆汁、鱼胆汁、薰蚊草汁和樱桃汁用偏光显微镜拍照了 140 多张球晶照片,发现了生物球晶的双马尔特十字。从物理实质出发,根据球晶外部高分子有序晶层和内部高分子无序聚集态粘滞系数的不同,从物理上建立了“抛物线光轴”模型,由此揭示了双马尔特十字是球晶内部高分子无序聚集态在外部有序晶层的作用力下形成的。根据液晶易流动性质和抛物线光轴变化规律,对球晶施加微小外力,可能对诊断生命体患病前的信息比其他诊断方式灵敏可靠。

**关键词:** 双马尔特十字; 抛物线光轴; 生物球晶; 无序聚集态

中图分类号: O753; O436.3 文献标识码: A

## The Formation Mechanism of Double Maltese Cross in Spherical Crystal in Organism

Su Yongdao Liang Wei Jin Weidong Zhang Hongdong Liao Guangxi

(School of Science, Jinan University, Jinan 250022)

**Abstract:** Spherical crystal in living organisms, which exists abundantly in the organisms of animals and plants such as brain, muscle, nerve, blood and bile etc, is one of lyotropic liquid crystals. Double Maltese cross of spherical crystal in living organisms is firstly found after chicken bile, fish bile, berry juice were observed by microscopes. After deeply investigated by optic methods, the forming mechanism of Double Maltese cross was found and a new concept of “parabolic principal axis” was proposed. Study indicates that Double Maltese cross is formed through the function of outer orderly crystal layers on the inner macromolecule. It may be more delicate and reliable to examine some serious diseases in their early stages according to the change of the parabolic principal axis of mildly forced spherical crystals.

**Key words:** double Maltese cross; parabolic optical axis; spherical crystal in organism; disordered gathering state

### 1 引 言

液晶不仅用于信息显示,例如液晶电视、液晶显示器、液晶光阀控制<sup>[1]</sup>,而且可以用于液晶存储和液晶光纤通信器件等<sup>[2,3]</sup>,还可以进行生命科学研究。液晶理论研究生命体内进行的生命过程已成为具有挑战性的热门课题<sup>[4]</sup>。生物球晶属于溶致液晶的一种聚集态,广泛存在于生物体组织内,所以在生物化学,生物物理学和生物医学及仿生学等领域十分引人注目。多数生物体组织,例如脑、神经、肌肉、血液等与生命现象密切相关的主要组织,就是由溶致液晶构成。1950 年李约瑟就大胆提出:“……生命系统本身

实际上就是液晶”<sup>[5,6]</sup>。早在 1991 年 Seddon 就指出:“在这个世界上,没有液晶就没有生命”<sup>[5]</sup>! 用日本 BH-2 型 Olympus 偏光显微镜,配 Moticam 480 数码相机拍摄了 140 多张生物球晶照片。发现了生物球晶的双马尔特十字现象。从物理实质出发,对其进行深入探讨,根据球晶外部高分子有序晶层(分子有序排列层)和内部高分子无序聚集态(分子无序的,杂乱无章的堆积状态)粘滞系数的不同,从物理上建立了“抛物线光轴”模型,揭示了双马尔特十字是球晶内部高分子无序聚集态在外部有序晶层作用力下形成的。对某些疾病的诊断和治疗可能起到一定的推动作用。

\* 山东省自然科学基金(Y2003G01)资助课题。

作者简介: 苏永道(1954—),男,济南商河人,教授,主要从事光学基础理论、光纤通信理论与技术研究。

E-mail: suyd618@163.com

收稿日期: 2006-09-14; 收到修改稿日期: 2006-12-26

## 2 生物球晶的外表特征和消光现象

### 2.1 球晶的外表特征

图 1 为光路图,将偏光显微镜起偏器去掉,保留检偏器,分别取鸡胆汁、鱼胆汁、薰蚊草汁和樱桃汁放在载玻片上,再放置盖玻片将它们夹持中间,形成均匀液膜,通过偏光显微镜观察,可看到液晶颗粒分散在液膜中。图 2 给出了鱼胆汁和樱桃汁的显微照片,它们大部分以球形颗粒的形式存在于液体中。

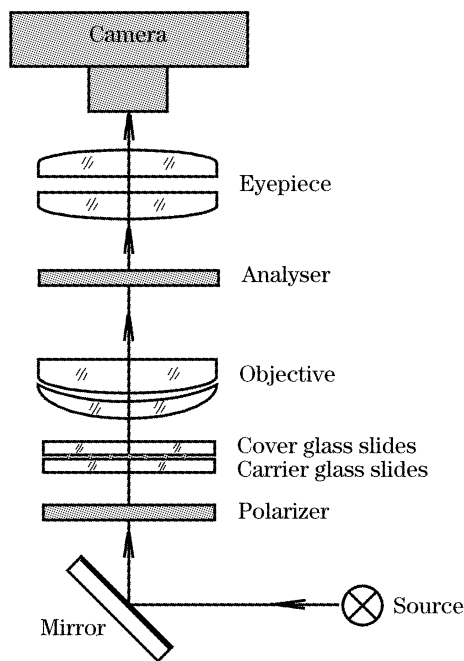
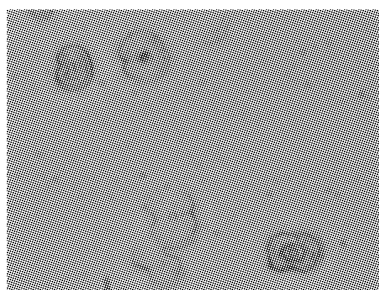
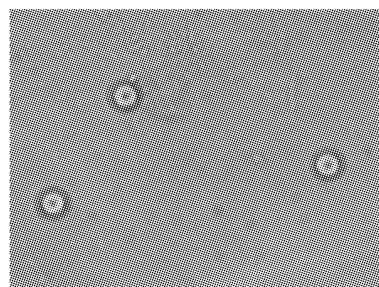


图 1 偏光显微镜实验光路图

Fig. 1 Optical path of polarized-light microscope



(a) the spherical liquid crystal in fish gall



(b) the spherical liquid crystal in cherry juice

图 2 动物和植物中的球形液晶

Fig. 2 Spherical liquid crystal in animals and plants

### 2.2 球晶的消光现象

生物球晶呈现出一种高度对称的织构结构,在

偏光显微镜下可以观察到消光的黑十字,即马尔特十字(Maltese Cross)。以上样品观察到的马尔特十字形状大致相同。可分为两种类型:第一种呈正圆形,周边有 4 个对称等大的双折射亮带,中间呈细窄的暗十字,形似梅花;第二种呈不太规则的圆形,周边 4 个宽大的双折射亮带对称不等大,中间出现细窄的黑十字。图 3 给出了鱼胆汁和樱桃汁生物球晶的马尔特十字显微照片。



(a) the Maltese cross in the spherical liquid crystal in fish gall



(b) the Maltese cross in the spherical liquid crystal in cherry juice

图 3 动物和植物中球形液晶的马尔特十字

Fig. 3 Maltese cross in the spherical liquid crystal in animals and plants

在樱桃汁球晶织构中,形成中心为暗区的“中空马尔特十字”。许多生命体中的球形液晶都可以观察到“中空马尔特十字”,例如,中蜂(*Apis cerana*)蛹脂肪体中的蛋白质颗粒也是中空马尔特十字。由此推断蛋白质颗粒属于“液晶层状相”中的球粒织构<sup>[7]</sup>,即球壳层状织构。

虽然溶致液晶广泛地存在于动植物体中,但是从

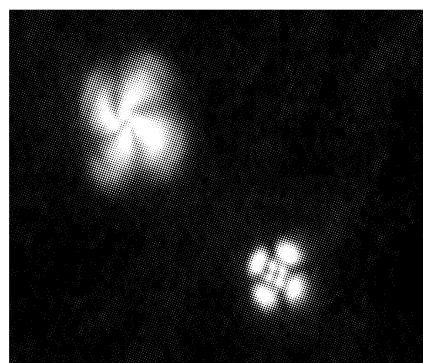


图 4 樱桃汁中球形液晶的双马尔特十字

Fig. 4 Double Maltese cross in spherical liquid crystal in cherry juice

组织中分离出液晶比较困难。图 4 是我们在樱桃汁球晶中发现的双马尔特十字显微照片。在大马尔特十字的中间还镶嵌着一个小的马尔特十字。它的形成过程是:在刚刚放置到载波片和盖玻片间的樱桃汁样品,因樱桃汁的流动,线度稍大的球晶被载波片和盖玻片固定,在受到流体切向力后,形成了内部的小马尔特十字。从图 4 还可看到另一球晶的马尔特十字像飞轮一样在旋转,这是线度稍小的球晶在流体流动时,整个球晶旋转出现的“飞轮马尔特十字”。

### 3 溶致液晶中的球晶织构

球晶是高分子多晶体的一种主要形式,可以从浓溶液或熔体冷却结晶时获得,当它的生长不受阻碍时其外形呈球状。球晶直径通常在  $0.5\sim 100\ \mu\text{m}$  之间,大的甚至可达厘米数量级<sup>[8]</sup>。例如,熔体冷却结晶时,获得的聚丙烯、聚乙烯球晶<sup>[9,10]</sup>,尼龙 69 等温结晶球晶和对聚羟基丁酸脂球晶<sup>[11,12]</sup>,它们均属于热致液晶,在偏光显微镜下观察,都可以观察到清晰的“黑十字”消光现象。人体和其他动物体内溶致液晶也具有黑十字消光现象<sup>[13~16]</sup>。

溶致液晶是由双亲化合物与极性溶剂组成的二元或多元体系,双亲化合物包括简单的脂肪酸盐、离子型和非离子型表面活性剂,以及与生物体密切相关的复杂类脂等一大类化合物。双亲分子互相缔合可以使体系具有最小的自由能。缔合时,非极性部分通过范德瓦耳斯(Van der Waals)力相互结合,极性部分通过静电引力相互作用。

溶致液晶的双亲分子在水溶液中缔合的最基本聚集态有三种,即层状结构、球形结构和圆柱形结构<sup>[8]</sup>,如图 5 所示。层状结构是双亲分子作平面排列,分子的疏水尾位于双层内部,亲水的极性头位于外面,双层内的烃链可以移动,在较低温度时,具有类流体性质,这种层状织构与热致液晶相十分相似。在层状织构,各层分子的长轴相互平行,并且垂直于层的平面,双亲分子层彼此平行排列并被水层分隔,

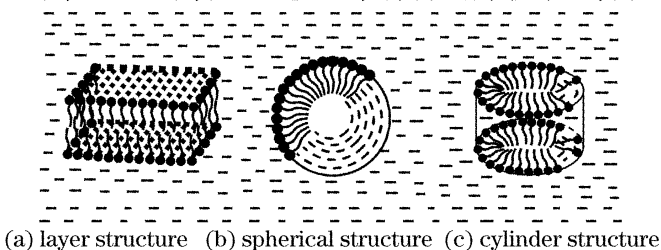


图 5 双亲分子在水溶液中的三种基本聚集态

Fig. 5 The three basic gathering states of both-attracted molecule in water

层状相液晶的光轴垂直于层面,是单轴晶体。在球形和圆柱形织构中,亲水头互相缔合排列于聚集体的外围。球形和圆柱形织构是胶团的两种形式,在水溶液中,当没有任何外力存在时,双亲分子堆积成球形织构,降低了极性头之间的排斥作用,当胶团溶液浓度增加时,体系的稠密性使球形变成圆柱形胶团。生物球晶属于复杂类脂,也属单轴晶体,具有光学双折射现象。

生物球晶在没有受到外力时,它的光轴就是球面法线,成球对称辐射状,如图 6(a)所示。当球晶光轴与起偏器透振方向平行时,通过球晶的光只有非常光 e 光,在球晶光轴与起偏器透振方向垂直时,通过球晶的光只有寻常光 o 光。这两个方向的光不能通过检偏器,形成暗场。而在其它方向上,入射偏振光的振动方向即不平行光轴,又不垂直光轴,所以透过球晶后的光分成了 o 光和 e 光,o、e 光合成后一般为椭圆偏振光,椭圆偏振光通过检偏器后为亮场,出现了马尔特十字。正因为球晶光轴呈球对称辐射状,所以转动载物台,生物球晶的马尔特十字始终不改变方向,如图 6(b)所示。

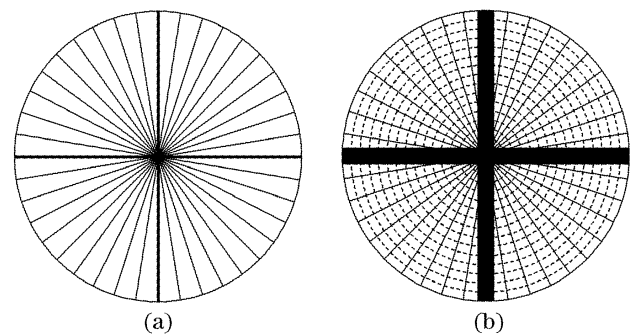


图 6 球晶光轴和马尔特十字

Fig. 6 The light shaft of spherical crystal and Maltese cross

小马尔特十字的形成是球晶受到外界切向力后,液晶内部无序聚集态的高分子长轴趋向重新排列所致。因为球晶内部无序聚集态的高分子处于液体状态而粘滞系数较小,在有序晶层内摩擦力的作用下,有无序聚集态逐渐趋向有序晶层转变。新形成的有序晶层在范德瓦耳斯力、静电力和外界切向力的共同作用下,内部高分子晶层的光轴的趋向不再呈球对称辐射状,而是呈类似抛体运动的“抛物线光轴”。溶致液晶一般属于近晶相(层状相)<sup>[17]</sup>,一层中,分子具有一定的平移自由度以及绕分子自己的长轴旋转的转动自由度。这种松散的组织形式使得分子层本身容易发生弯曲形变。另外,平滑的分子层之间很容易产生相对的滑动。但是,在垂直于

分子层的方向,要保持分子层自己的完整性,因而粘滞性要大得多,分子不能自由地从一个分子层跳到另一个分子层中去<sup>[18]</sup>。即有序晶层的光轴受外界切向力的影响小,而内部无序聚集态的高分子重新生成有序晶层时,受外界切向力的影响大,因此小马尔特十字和大马尔特十字之间出现清晰的分界线。

### 4 球晶内部的抛物线光轴模型

#### 4.1 抛物线方程的建立

球晶内部无序聚集态的高分子,在受到外部有序晶层作用力后,新形成的有序晶层出现扭转某一角度的小马尔特十字。显然新形成的有序晶层,光轴不再是直线。

设  $p$  为抛物线焦点到准线的距离,称为抛物线焦点参量。球型液晶受到的外界切向力不同时,抛物线参量不同,属于变量,是生物球晶所受外力的函数。图 7 中抛物线开口宽度为  $2b$ ,高度为  $h$  时,则抛物线焦点参量  $p = b^2/2h$ 。在图 8 的直角坐标系  $y-x$  中,虚线抛物线的方程为

$$y^2 = 2p(x + \epsilon), \quad (1)$$

(1) 式中,  $\epsilon$  是坐标原点  $o$  偏离抛物线顶点的待定量。将直角坐标系  $y-x$  连同抛物线绕坐标原点  $o$  旋转  $\alpha$  角,则成为新直角坐标系  $y'-x'$ 。因此新坐标系中的实线抛物线的方程为

$$\begin{cases} y' = 2p'(x' + \epsilon), \\ \begin{cases} y' = y \cos \alpha - x \sin \alpha, \\ x' = x \cos \alpha + y \sin \alpha, \\ p' = p \cos \alpha, \end{cases} \\ (y \cos \alpha - x \sin \alpha)^2 = 2p \cos \alpha [(x \cos \alpha + y \sin \alpha) + \epsilon], \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式是坐标旋转  $\alpha$  角度后,用原坐标系表示新坐标系的抛物线方程。设起偏器的透振方向平行于  $x$  轴,检偏器的透振方向平行于  $y$  轴。当抛物线旋转任意角度时,斜率等于零、斜率等于无穷大点处的光

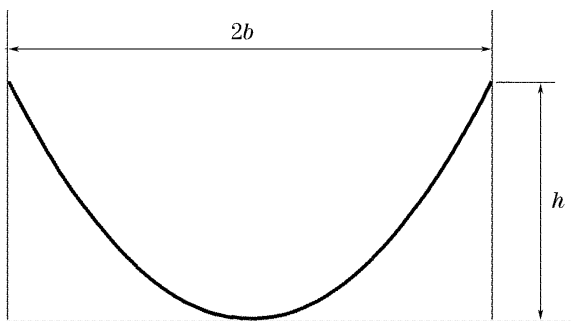


图 7 抛物线参量图

Fig. 7 Parameter diagram of parabola

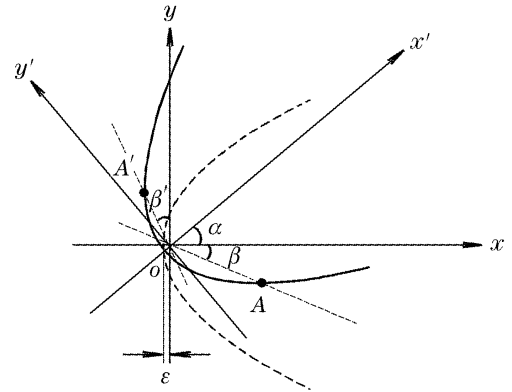


图 8 抛物线沿坐标原点  $o$  旋转  $\alpha$  角后的坐标图

Fig. 8 The coordinate after the parabola revolved around origin by  $\alpha$  degree

轴必然与起偏器、检偏器透振方向平行和垂直。因此斜率等于零、斜率等于无穷的点为暗点,也就是黑十字的一个点。微分式(2)可得抛物线斜率等于零、斜率等于无穷的点,由此可以求得对应的  $x, y$  值。通过对(2)式微分得,抛物线的斜率为

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y \sin \alpha \cos \alpha - x \sin^2 \alpha + p \cos^2 \alpha}{y \cos^2 \alpha - (x + p) \sin \alpha \cos \alpha}. \quad (3)$$

抛物线旋转  $\alpha$  后,斜率等于零的点,如图 8 中的  $A$  点所示。

当  $dy/dx = 0$  时,即

$$y \sin \alpha \cos \alpha - x \sin^2 \alpha + p \cos^2 \alpha = 0,$$

则

$$y = x \tan \alpha - \frac{p}{\tan \alpha}, \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式得  $x$  的表达式为

$$x = \left( \frac{p}{2 \tan^2 \alpha} + p \right) \cos^2 \alpha - \epsilon \cos \alpha, \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式消掉  $x$ ,得  $y$  的表达式为

$$y = \frac{p}{\tan \alpha} \left( \frac{\cos^2 \alpha}{2} - 1 \right) - p \sin \alpha \cos \alpha - \epsilon \sin \alpha, \quad (6)$$

(5) 式、(6) 式可以看出,  $x, y$  都与抛物线旋转角度  $\alpha$ 、抛物线焦点参量  $p$ 、待定量  $\epsilon$  有关。图 8 中的  $A$  点,就是球晶内部抛物线斜率等于零的点。过坐标原点  $o$  和  $A$  点所作的直线  $oA$  与  $x$  轴的夹角  $\beta$ ,就是球晶内部小马尔特十字左旋时的角度,  $\beta$  为

$$|\beta| = \arctan(y/x), \quad (7)$$

待定量  $\epsilon$  已知时,将(5)式、(6)式代入(7)式,便可求出球晶内部小马尔特十字左旋时的角度  $\beta$ 。

抛物线旋转任意角度  $\alpha$ ,其上斜率等于无穷的点,  $A'$  点所示。

当  $dy/dx = \infty$  时,即

$$y \cos^2 \alpha - (x + p) \sin \alpha \cos \alpha = 0,$$

则

$$y = (x + p)\tan \alpha, \quad (8)$$

在此用  $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$  表示  $x$ 、 $y$ ，将(8)式代入(2)式得  $\hat{x}$  的表达式为

$$\hat{x} = -\frac{p}{2}\sin^2\alpha - \epsilon\cos\alpha, \quad (9)$$

将(9)式代入(8)式消掉  $\hat{x}$ ，得  $\hat{y}$  的表达式为

$$\hat{y} = p\tan\alpha - \frac{p}{2}\sin^2\alpha\tan\alpha - \epsilon\cos\alpha\tan\alpha, \quad (10)$$

同理， $\hat{x}$ 、 $\hat{y}$  也都与抛物线旋转角度  $\alpha$ 、抛物线焦点参数  $p$ 、待定量  $\epsilon$  有关。 $A'$  点，就是球晶内部抛物线斜率等于无穷的点。过坐标原点  $o$  和  $A'$  点所作直线  $oA'$  与  $y$  轴夹角  $\beta'$ ，就是球晶内部小马尔特十字右旋时的角度， $\beta'$  为

$$|\beta'| = \arctan(\hat{x}/\hat{y}), \quad (11)$$

待定量  $\epsilon$  已知时，将(9)式、(10)式代入(11)式，便可求出球晶内部小马尔特十字右旋时的角度  $\beta'$ 。

#### 4.2 求待定量 $\epsilon$

抛物线在旋转过程中，小马尔特十字左旋角度  $\beta$  和右旋角度  $\beta'$  相等，于是有

$$\tan\beta = y/x = \tan\beta' = \hat{x}/\hat{y},$$

把(5)式、(6)式和(9)式、(10)式代入整理后得待定量  $\epsilon$  为

$$\epsilon = 2p\left(\frac{\cos^2\alpha + \sin\alpha - 2\sin^3\alpha}{3\sin^22\alpha + 4}\right)\sin\alpha\cos\alpha, \quad (12)$$

从(12)式待定量的表达式可以看出，待定量的大小与抛物线旋转的角度  $\alpha$  有关。图 7 中， $p = 2.06$ ， $\alpha$  从  $0 \sim 90^\circ$  每隔  $5^\circ$  旋转抛物线。凡是能够出现斜率等于零、斜率等于无穷的  $\alpha$  角皆计算出  $\epsilon$  的值，然后取平均，平均值为 0.14。则由(7)式、(11)式求出不同  $\alpha$  角对应  $\beta$ 、 $\beta'$ ，同时记录  $y$ 、 $\hat{y}$  值，并计算出相对  $90^\circ$  的相对误差，如表 1 中的数据所示。小马尔特十字左旋时，表 1 中  $\alpha = 15^\circ \sim 25^\circ$ ， $x \gg 2p$ ，按图 6 所绘制的抛物线， $x$  不存在。通过计算， $\alpha = 70^\circ$  时，在  $90^\circ$  的象限内抛物线斜率等于零、斜率等于无穷也不存在。可以认为相对  $90^\circ$  而言，在相对误差小于 2.7% 的  $|y|$  和  $\hat{y}$  在最小时，二者的平均值可作为无序聚集态的线度。 $|y| = 0.362$ ， $\hat{y} = 0.497$  都是相对误差小于 2.7% 的最小值。假设焦点参数  $p = 2.06$ ，球晶内部无序聚集态的半径为  $(|y| + \hat{y})/2 = 0.43$ ，则直径等于 0.86，占  $4p(8.24)$  的 10%，约占总球晶线度的 5%。如果把球晶在显微镜中放大到 10 mm，球晶受到外力后，其剩余无序聚集态的线度只有 0.86 mm。因此，双马尔特十字的中间看不到空洞，这与图 3 中的小马尔特十字中心相一致。从抛物线

斜率等于零、斜率等于无穷的点，以及球晶受力后的剩余无序聚集态的线度可以看出，抛物线光轴理论与实验吻合较好。对于最内层误差大于 2.7%，说明球晶内部受到的内摩擦力、球晶内部的粘滞系数分布、靠近球心处仍有高分子处在无序状态等因素有关，这也正是球晶受力后剩余无序聚集态的线度。

表 1 小马尔特十字左旋和右旋部分参量 ( $p = 2.06$ )

Table 1 Some parameters of sinistrorse letter Maltese Cross and dextrorotatory letter Maltese Cross ( $p = 2.06$ )

$\alpha/(\circ)$	$\epsilon = 0.14$			$\epsilon = 0.14$		
	Left circle $\beta/(\circ)$	Error	$y$	Right circle $\beta'/(\circ)$	Error	$\hat{y}$
15	13.4	0.136	3.623	22.3	0.007	0.497
20	16.6	0.071	2.547	21.0	0.023	0.658
25	18.9	0.045	1.873	20.9	0.023	0.816
30	20.6	0.027	1.408	22.0	0.011	0.936
35	21.7	0.014	1.067	22.0	0.011	1.125
40	22.5	0.006	0.811	22.6	0.005	1.281
45	23.0	0.000	0.614	23.0	0.000	1.446
50	23.6	0.007	0.464	23.1	0.001	1.682
55	25.5	0.027	0.362	23.9	0.010	1.740
60	26.8	0.043	0.269	21.8	0.013	2.108
65	32.2	0.102	0.218	20.1	0.032	2.476
70	no	—	—	no	—	—

因为液晶高分子排列紧密，可认为光轴是连续的，但是为了直观和绘图方便，取图 7 中抛物线的右半部和左半部的弧长，每隔  $9^\circ$  步进旋转，分别画出不同角度的抛物线簇，表示生物球晶受到不同方向的切向力，见图 9(a)、图 9(c)。抛物线簇中每条曲线斜率等于零、斜率等于无穷点的连线，就是球晶内部

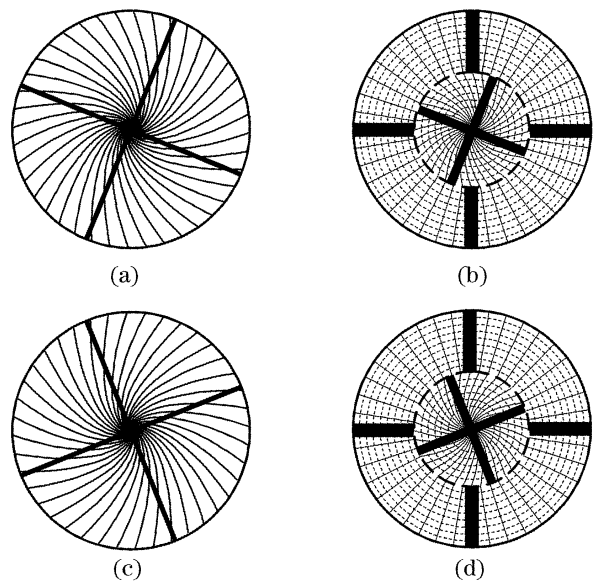


图 9 球晶内部小马尔特十字的旋转原理  
Fig. 9 The principle of the revolution of lesser Maltese cross

的小马尔特十字,见图 9(b)、图 9(d)。其中,图 9(a)、图 9(b)是内部各层液晶高分子长轴沿逆时针涡旋时,球晶内部小马尔特十字就右旋(即顺时针旋转)。图 9(c)、图 9(d)是球晶内部各层液晶高分子长轴沿顺时针涡旋时,则小马尔特十字就左旋(即逆时针旋转)。球晶内部小马尔特十字旋转的角度大小与抛物线的焦点参量  $P$  有关,球晶受到的外力越大,小马尔特十字旋转的角度就越大。

## 5 结 论

通过对双马尔特十字的研究,进一步揭示了生物球晶的光学特性。溶液浓度达到一定程度后,高分子在液体某处无序的聚集到一起,在无序聚集态的基础上,逐层形成了光学各向异性外部区域,从而形成球晶。在球晶没有受到外力作用时,内部继续保持无序聚集态,因此观察到所谓的“中空马尔特十字”。当球晶受到外力作用后,无序聚集态的高分子在外层有序晶层的带动下,逐渐向有序态转化,转化为有序态的各分子层,形成了新的光轴,新光轴不再是人们熟知的球对称辐射光轴,而是抛物线光轴。球晶其它横截面上的光轴投影,也均为抛物线光轴,于是从偏光显微镜中看到是旋转某一角度的小马尔特十字。需要说明的是,抛物线光轴的理论模型还不十分成熟,有待通过更多的实验进行更加深入的研究与探讨。

## 参 考 文 献

- Zhou Jie, Liu Xu, Li Haifeng. Theoretical design method for improving the polarization performance of LCLV projection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 63~66 (in Chinese)  
周 杰, 刘 旭, 李海峰. 改善液晶光阀投影光学系统偏振特性的理论设计方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 63~66
- Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal light modulator with high precision and pure phase[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1682~1685 (in Chinese)  
刘永军, 宣 丽, 胡立法等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1682~1685
- Ye Biqing, Chen Jun, Norihiro Fukuchi *et al.*. Oblique-incidence characteristic of parallel-aligned nematic-liquid-crystal spatial light modulator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(5): 587~590 (in Chinese)  
叶必卿, 陈 军, 福智昇央等. 斜入射液晶空间光调制器的特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 587~590
- Guan Ronghua, Kang Wenxiu. The physical research and development on organism liquid crystals[J]. *Modern Physics*, 2003, **2**: 22~23 (in Chinese)  
关荣华, 康文秀. 生物液晶物理研究及其进展[J]. *现代物理知识*, 2003, **2**: 22~23
- Liu Jixing. The successful combination of physics and life science liquid crystal and biomembrane[J]. *Encyclopedic Knowledge*, 1995, **12**: 15~16 (in Chinese)  
刘寄星. 物理学和生命科学成功的结合液晶与生物膜[J]. *百科*

- 知识, 1995, **12**: 15~16
- Li Lanying, Wu Changcheng, Yao Kangde. Liquid crystalline biomacromolecules[J]. *Chemistry*, 2005, **10**: 745~750 (in Chinese)  
李兰英, 武长城, 姚康德. 生物液晶[J]. *化学通报*, 2005, **10**: 745~750
- Xu Xuehong, Wang Chunlin, Ai Xi. The proof of quality of granular liquid crystals in fatty cell protein from pupas of Bees [J]. *Biological Chemistry and Biological Physics*, 1994, **26**(1): 105~110 (in Chinese)  
徐学红, 王春林, 艾 析. 中蜂(*Apis cerana*)蛹期脂肪体营养细胞蛋白质颗粒液晶性质的证明[J]. *生物化学与生物物理学报*, 1994, **26**(1): 105~110
- Chen Guanrong. *Crystals Derived From Dissolution* [M]. Beijing: Chemical Engineering Encyclopedia, 1998, **18**: 661~662  
陈冠荣. *化工百科全书* [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998, **18**: 661~662
- Zheng Shi, Xin Zhong, Shen Shufeng *et al.*. Application of  $\beta$ -form nucleating agent for polypropylene [J]. *J. East China University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2006, **32**(1): 12~15 (in Chinese)  
郑 实, 辛 忠, 申书逢等.  $\beta$ 型成核剂在聚丙烯中的应用[J]. *华东理工大学学报(自然版)*, 2006, **32**(1): 12~15
- Mingtao Run, Chenguang Yao, Yingjin Wang. Morphology, isothermal and non-isothermal crystallization kinetics of poly(methylene terephthalate) [J]. *European Polymer J.*, 2006, **42**: 655~662
- Zhao Qingxiang, Liu Minying, Wang Yudong *et al.*. Study on the spherulitic morphology of nylon 69 and its formation condition in isothermal crystallization [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2002, **18**(5): 128~130 (in Chinese)  
赵清香, 刘民英, 王玉东等. 尼龙 69 等温结晶形态与生成条件研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2002, **18**(5): 128~130
- Liu Meihua, Wang Jing, Yang Chuanmin *et al.*. Experimental investigation on microscopic structure and mechanical properties of PHB [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2006, **37**(8): 15~19 (in Chinese)  
刘美华, 王 静, 杨传民等. 对聚羟基丁酸脂球晶微观结构与力学行为试验研究[J]. *农业机械学报*, 2006, **37**(8): 15~19
- Zhou Jianli, Yang Haimin, Wu Jie *et al.*. The optic properties of bile liquid crystals in organisms [J]. *Academic J. Kunming Medical College*, 2000, **21**(2): 1~4 (in Chinese)  
周建莉, 杨海珉, 吴 杰等. 生物胆汁液晶光学性质[J]. *昆明医学院学报*, 2000, **21**(2): 1~4
- Yang Haimin, Wu Jie, Li Jingyi *et al.*. Study on optic properties of bile liquid crystals in human body [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 1995, **11**(1): 93~97 (in Chinese)  
杨海珉, 吴 杰, 李静仪等. 人体胆汁液晶光学性质的研究[J]. *生物物理学报*, 1995, **11**(1): 93~97
- Zhu Jie, Sun Runguang. Applications of physical techniques and methods in the study of lyotropic liquid crystal [J]. *Chin. J. Liquid Crystals and Displays*, 2005, **20**(3): 240~243 (in Chinese)  
朱 杰, 孙润广. 物理技术与方法在溶致液晶结构研究中的应用[J]. *液晶与显示*, 2005, **20**(3): 240~243
- Hideto Tsuji, Yoshihisa Echizen, Yoshiro Nishimura. Photodegradation of biodegradable polyesters: a comprehensive study on poly(L-lactide) and poly( $\epsilon$ -caprolactone) [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, **91**: 1128~1130
- 立花太郎. *Liquid Crystal Knowledge* [M]. Tan Manqi, Ding Xuequan transl., Beijing: Science Popularization Publisher, 1984. 90~91 (in Chinese)  
立花太郎. *液晶知识* [M]. 谈漫琪, 丁学泉译, 北京: 科学普及出版社, 1984. 90~91
- Xie Yuzhang. *Liquid Crystal Physics* [M]. Beijing: Science Press, 1988. 587~588 (in Chinese)  
谢毓章. *液晶物理学* [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 587~588