

# 生物矿化硬体显微构造(生矿体结构) 的分类和演化

戴永定 沈继英

中国科学院地质研究所 北京 100029)

**关键词** 生矿体结构 类型划分 门类分布 发生顺序 演化关系

生物矿化硬体的显微构造亦可称为生物矿物体结构、简称生矿体结构。它指的是组成矿物结晶个体或复体的形态、大小、排列、取向及其相互关系。本文拟从分类、门类分布、生成顺序、地史演化和接触关系等方面予以介绍。

## 1 生矿体结构分类

按组成晶体的空间形态和光性轴取向,可分为无延向、无取向的点型,单延向和单取向的线型、双向延长的面型和三延向和三取向的体型,还有原始的胶结结构和后来的再生结构。然后再按晶体的大小、排列和取向等其他特征加以细分。

**1.1 胶结结构** 由生物分泌有机质(粘多糖或几丁质)或非晶质的碳酸钙和氧化铁、非晶硅、胶结环境中的石英、长石、方解石和云母等矿物颗粒、钙质和硅质粒屑和骨屑(生矿体),甚至粘土微粒和火山玻璃,如原生动物的胞壳和多毛纲栖管。

**1.2 点型(粒状)结构** 由三向大致等轴,光性轴无取向的生物晶体组成。

**1.2.1 隐粒结构** 由小于  $0.5-1\mu\text{m}$  结晶颗粒组成,在显微镜下薄片无色暗不透明,如珊瑚藻科镁方解石细胞壁。

**1.2.2 微粒结构** 由  $1-5\mu\text{m}$  结晶颗粒组成,在显微镜薄片无色浅微透亮,如砂盘虫科有孔虫方解石壳。

**1.2.3 粒纤结构** 或不规则纤状结构,形态为纤状,排列不规则,如小粟虫目有孔虫镁方解石

壳和绿藻文石壳。

**1.3 线型(纤状)结构** 由平行或放射排列的单延向晶体组成,其光性 C 轴与延向近乎一致。纤体断面呈多边形,直径  $0.2-2\mu\text{m}$  或更小。按纤体排列和延伸加以细分(图 1)。

**1.3.1 球纤结构** 纤体从矿化中心向周围放射生长,形成球体,如弱矿化的十足目和四射珊瑚。

**1.3.2 柱纤结构** 纤体由矿化中心线向一个方向呈束状或喷泉状连续上斜生长,组成多角柱或骨针,如四射和四射珊瑚。

**1.3.3 柱层纤结构** 纤体由假想中心线向一个方向呈喷泉状周期性前斜生长,组成多角柱,其层纹比放射线清晰,并切断放射线,如多板纲关节层。

**1.3.4 层纤结构** 纤体由矿化中心面向一侧或两侧垂直生长,并随基面弯曲而改变方向。由于纤体生长的周期性,多形成层纹,如某些强矿化的介形虫和十足目。

**1.3.5 玻纤结构** 纤体直径小于  $0.5-1\mu\text{m}$ ,延伸呈螺旋形(如大多数甲壳纲和异足目、翼足目),或直线形(如轮虫目有孔虫),垂直壳面,并随壳面弯曲而改变方向。在偏光显微镜下显玻质结构和波状消光。

**1.4 面型(片状)结构** 由近乎平行、双向或单向延长的生物晶体以各种方式叠积而成。

**1.4.1 叶状结构** 叶纹平行于壳面或孔腔边

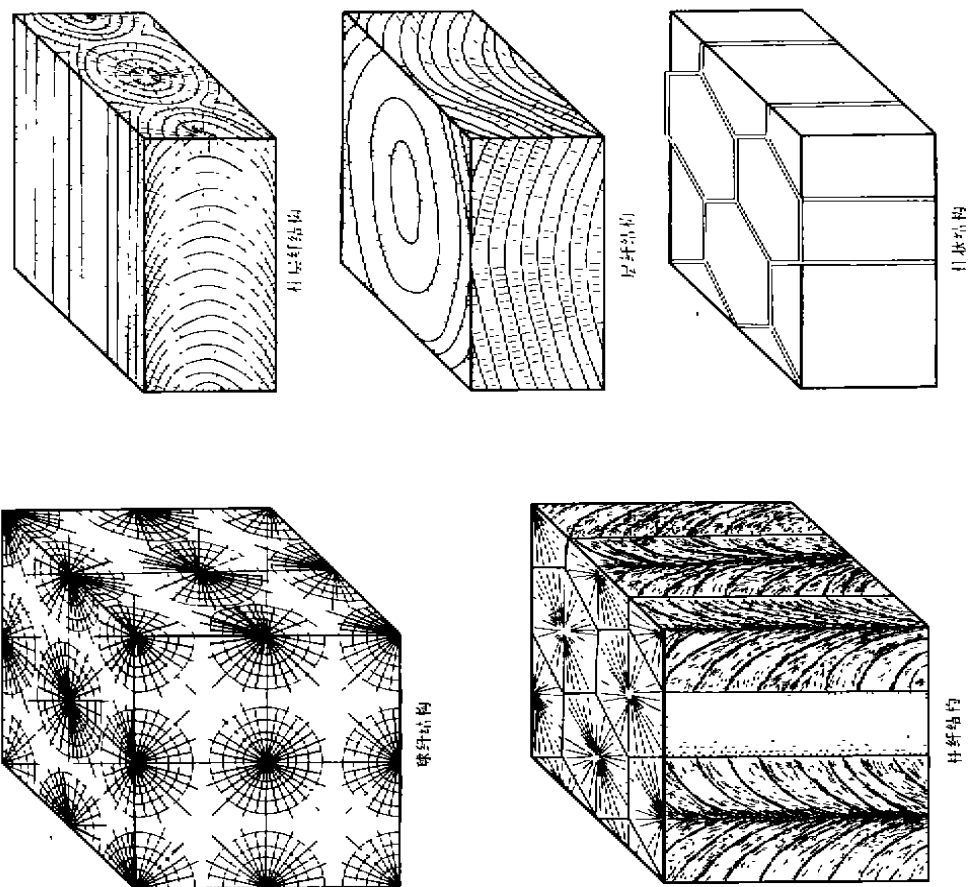


图 1 各种纤维结构和柱状结构立体示意图

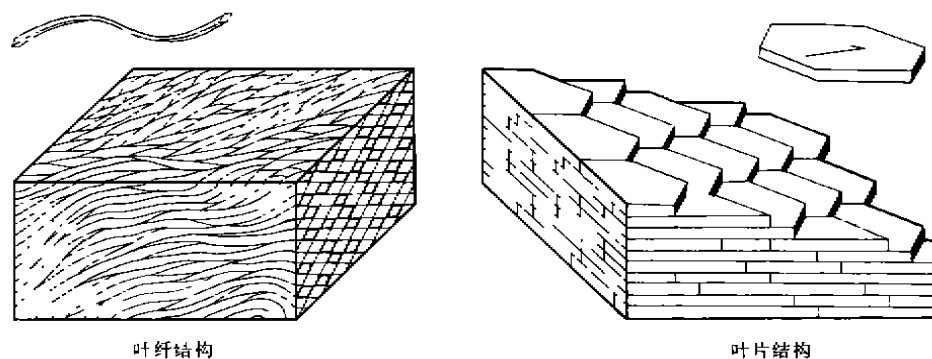


图 2 叶状结构立体示意图

缘。组成叶纹的生物晶体长轴和光性 C 轴大致平行于叶纹。同一叶纹中生物晶体长轴或光性 C 轴取向相同, 相邻叶纹中生物晶体长轴或 C 轴取向有差异。叶状可分为叶纤和叶片两种结构(见图 2)。

**1.4.1.1 叶纤结构** 方解石叶纤结构仅见于有铗

纲腕足类。纤柱直径 0.5—5 $\mu\text{m}$ , 长 2—15 $\mu\text{m}$ , 最大达 40 $\times$ 400 $\mu\text{m}$ ; 断面呈菱形、矩形或刀片形。纤柱随叶纹弯曲而弯曲, 其光性 C 轴与延向不一致。碳磷灰石叶纤结构仅见于脊椎动物齿质, 纤体直径仅 4 $\times$ 20nm, 光性 C 轴与延向一致。

**1.4.1.2 叶片结构** 镁方解石叶片结构仅见于

苔藓虫和无铰纲,以螺旋位错式生长。叶片厚 $0.2-2\mu\text{m}$ ,长 $3-20\mu\text{m}$ ,光性C轴包含于叶片内。碳磷灰石叶片结构仅发育于脊椎动物骨质。叶片大小 $2\text{nm} \times 25\text{nm} \times 50\text{nm}$ ,与磷质纤体一样随着石化程度加深而熔接增大。

**1.4.2 交错纹结构** 纹呈楔形或板状,厚 $4-60\mu\text{m}$ 。纹中间轴或多或少垂直壳层面,纹长轴或平行放射线(径向,如腹足类),或垂直放射线(弦向,如双壳类)。纹或近乎直立,两端与壳层面直交,如腹足类;或倾斜,两端与壳层面平行尖灭,如双壳类。纹可由厚小于 $1\mu\text{m}$ 的小片组成,小片与壳层面交角为 $41^\circ$ 。同一纹的小片排列方向相同,光性C轴近乎一致;相邻纹的小片倾斜方向相反,相互交错达 $82-98^\circ$ ,最大达 $120^\circ$ ,光性C轴方向相差 $8-10^\circ$ ;两相隔纹的小片排列方向相同,C轴方向近乎一致(见图3)。

**1.4.2.1 交错纹纤结构** 小片由单层片条组成,片条厚 $0.3-1\mu\text{m}$ ,宽长 $10-30\mu\text{m}$ ,如腹足类和多板纲。

**1.4.2.2 交错纹片结构** 小片由单层纤体组

成,小纤粗 $0.3-1\mu\text{m}$ ,长 $3-15\mu\text{m}$ ,如双壳类和掘足类。

**1.4.2.3 复杂交错纹(纤或片)** 为交错纹变种,纹呈不规则块状体,相互交织在一起,界线不清,仅见于异齿亚纲、翼形亚纲和古腹足目。

**1.4.2.4 交错纤状结构** 仅见于腹足类或掘足纲中柱层纤或层纤结构与交错纹纤结构的过渡薄层中,纤体不组成小片或纹。

**1.4.3 珍珠结构** 由圆形或六方形文石小板水平连接并垂直叠积而成(见图4)。小板厚 $0.4-2\mu\text{m}$ ,直径 $3-10\mu\text{m}$ ,光性C轴垂直板面,板面可见左或右旋纹。珍珠结构含有有机基质壳脘( $\beta$ -角脘)很高,分布于层间、晶间和晶内,形成水平层纹和垂直壁纹。珍珠层具叠锥生长和叠积生长两种方式。叠锥生长见于头足类和腹足类的旋管壳和双壳类中层,壳脘和文石同时分泌,形成柱状珍珠层。叠积生长见于双壳类和单板类板状壳内层,壳脘与文石层交替分泌,形成层状珍珠层。

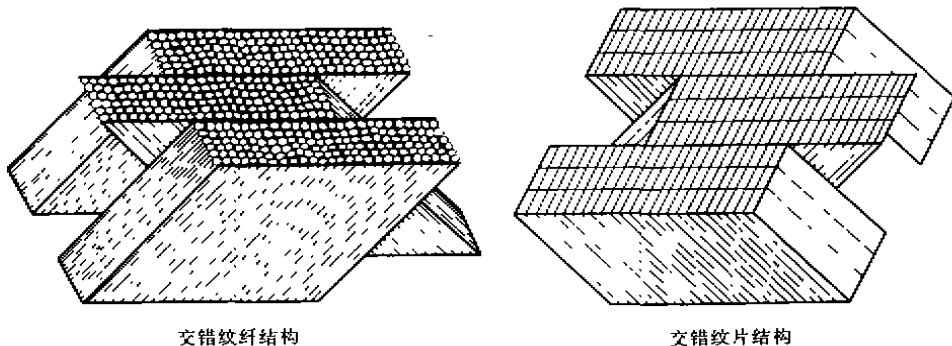


图3 交错纹结构立体示意图

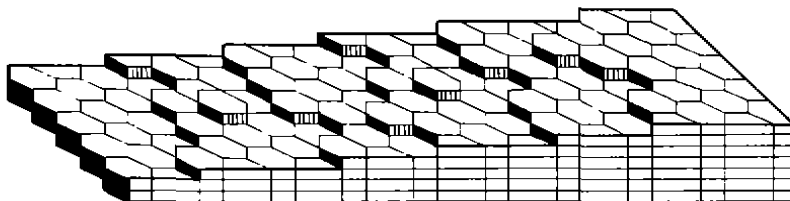


图4 珍珠结构立体示意图

**1.5 体型(单晶)结构** 整个生物矿物体,如骨板、骨片或骨针完全由单一晶体或双晶组成,无颗粒界线,在偏光显微镜下薄片显一致消光

或双晶消光,如棘皮动物。

**1.6 再生结构** 生物活着时由原生结构经矿物和结构变化而形成的新结构。

**1.6.1 晶粒结构** 由大于 5—10 $\mu\text{m}$  的方解石晶体颗粒镶嵌而成,在偏光显微镜下薄片透亮。它一般在生物死后由各种文石结构变来;但在腹足类和双壳类活着时,文石纤状外层方解石化初期可以存在晶粒结构薄层或不规则斑点,如鲍科、海蜗牛科和猿头蛤科。

**1.6.2 柱状结构** 方解石呈多角柱形,直径一般大于 5—10 $\mu\text{m}$ 、长轴垂直或倾斜壳面,光性 C 轴方位不定,柱间具壳肌壁,柱内具壳肌横纹,如珧蛤超科和脊椎动物蛋壳(见图 1)。

**1.6.3 交错叶片结构** 方解石小片倾斜角只有 3—27°,其交错角比交错纹小,交错叶片也比交错纹宽,可达 184 $\mu\text{m}$ 。小片光性 C 轴大致与生长方向一致,与叶片面有一定交角,如牡蛎超科。

**1.6.4 玻质结构** 在偏光显微镜下不显生物晶体颗粒,呈玻璃质,具波状消光;但在扫描电镜下显示原生结构。它是在低温或缺氧条件下分泌能力降低,引起生物晶体变小和构造排列破坏而产生,如北极蛤和帮斗蛤超科。

## 2 生矿体结构类型的门类分布

**2.1 胶结结构** 为细菌、低级藻类,低级原生动物和多毛纲的主要结构类型,由各种各样矿物成分组成。

**2.2 点型(粒状)结构** 为矿化细菌、藻类和原生动物的主要结构类型,在海绵、腔肠和苔藓动物中呈早生层或幼年期壳保留,在腕足和软体动物表壳(角质)层下有残留,可由各种生物矿物组成。

**2.3 线型(纤状)结构** 为海绵、腔肠和节肢动物的主要结构类型,在苔藓、腕足、软体和脊索动物中可保留在低级纲目,或呈低级生矿体(如骨针)、幼年期壳和早生层,而在藻类和原生动物要到高级演化阶段才能出现,如轮藻藏卵器和轮虫目有孔虫。柱层纤结构仅见于栗蛤、满月蛤、樱蛤、帘蛤、马蹄螺和蛾螺 6 超科外壳层。螺旋玻纤结构仅见于大多数甲壳纲、翼足目和异足目、脊椎动物釉质层。线型结构可由碳酸钙、碳磷灰石和二氧化硅矿物组成,柱层纤

结构仅由文石组成。

**2.4 面型(片状)结构** 仅见于三胚层动物。叶状结构为苔藓、腕足和脊索动物的主要结构类型,在环节动物多毛纲仅到高级的龙介科才出现。它可由碳酸钙和碳磷灰石矿物组成,碳酸钙矿物以镁方解石为主。叶纤结构仅见于有较腕足类方解石壳和脊椎动物齿质层。交错纹结构广泛分布于双壳、掘足、腹足和多板等 4 纲。珍珠结构为头足纲普遍而主要的结构类型,也见于单板纲、双壳纲(除异齿亚纲外)和翁戎螺、马蹄螺两超科。交错纹和珍珠结构仅由文石组成。

**2.5 体型(单晶)结构** 为棘皮动物唯一的结构类型,在钙质海绵骨针、盘旋虫超科有孔虫和全颗石藻目中也存在。除后者为方解石外,其余都为镁方解石。

**2.6 再生结构** 主要分布于双壳纲和腹足纲。晶粒结构仅见于前鳃亚纲的梯螺、海蜗牛、蝶螺和鲍等 4 科。柱状结构分布于前鳃亚纲的翁戎螺、帽贝、蛭螺、滨螺、梯螺、帆螺、骨螺和细带螺 8 超科和翼形亚纲的珧蛤、珍珠贝、贻贝和牡蛎 4 超科。交错叶片结构仅分布于古腹足目的帽贝和蛭螺两科、珍珠贝目的牡蛎、扇贝、不等蛤和铎蛤 4 超科。玻质结构分布于似栗蛤、蛭海螂、蚕豆蛤、北极蛤、帘蛤、开腹蛤、裂蛤、帮斗蛤、孔螂、翁戎螺和马蹄螺等超科。

## 3 生矿体结构类型在个体发育过程中生成顺序

### 3.1 六射珊瑚(澄黄滨珊瑚和鹿角杯形珊瑚)

造骨细胞先分泌一层类粘肌,其上沉淀均匀粒状(镁)方解石,形成基板。然后再沉淀球状结晶集合体(可能为镁方解石),形成原始隔壁和早生层。最后生成较大的丛状或束状文石纤晶,呈柱纤结构,组成基板晚生层、隔壁和外壁。

**3.2 环口目苔藓虫** 新虫室形成时先形成微粒半横板,从基层插入;然后延长形成虫室间壁,最后达到端膜,与端膜微粒层相连接。这时微粒层生长停止,而叶片层继续发育,进入虫室

外壁。

**3.3 有铍腕足类**(横宽穿孔形贝) 胚壳由表壳层和微粒层组成。形成幼年期壳后产生叶纤晚生层。

**3.4 腹足纲** 马蹄螺科的泽昆茨螺首先在幼虫壳中产生纤状层,然后在第三螺环产生珍珠层。翁戎螺科纯黑似藤螺珍珠层从第二环开始发育,插入于纤状层和交错纹层之间,并逐渐全部取代交错纹。翼足类小柱嘴状螺外壳在胚胎期先生成正纤薄层,胚后才形成玻纤层,纤体呈螺旋形。

**3.5 双壳纲** 马氏珍珠贝幼虫壳由文石微粒和细杆状晶体组成,青年期壳由方解石柱状和文石珍珠层组成。扇贝科瑞穗海扇幼虫壳由文石微粒晶体组成,扇贝科右瓣在早期生长发育阶段出现过方解石柱状层,扇贝科成年期壳为交错叶片±交错纹和复杂交错纹。

**3.6 头足纲**(巴甫洛夫菊石化石) 胚壳由微粒层和不完整的柱纤层组成早期壳壁。胚后幼年期才出现完整的柱纤层,形成晚期壳壁。当壳壁生长到一又4分之一轮环时才出现珍珠层,夹于较厚的外柱纤层和较薄的内柱纤层之间,而微粒层不再生长。

## 4 生矿体结构类型的地史演化

**4.1 有孔虫** 从震旦纪末期就出现粘多糖壳(瓶虫科),从寒武纪初出现胶结壳(星根虫科),从寒武纪出现微粒壳(拟砂户虫超科),从晚志留世出现层纤内层(似节房虫科),从早石炭世出现粒纤(不规则纤状)壳(菲休虫科),从中石炭世出现玻(层)纤壳(节房虫科),从上石炭世出现单晶壳。到中生代,玻(层)纤壳愈来愈发育;除粒纤壳外,其他类型逐渐衰落。

**4.2 腕足类** 无铍腕在早寒武世早期初出现碳氟磷灰石纤状壳,到早寒武世早期末出现镁方解石层纤+叶片壳。有铍腕在早寒武纪中期出现叶纤壳(正形贝超科),到奥陶纪才出现叶片壳(扭月贝目)。叶片壳可能是由正形贝目中的艾苏贝科叶纤层经伯灵贝科叶片层变来。

**4.3 软体动物** 早寒武世早期初古腹足目的

文石柱纤+交错纹纤壳可能与单板纲的文石柱纤+珍珠壳近乎同时出现。早奥陶世出现的竹节石纲(化石)为方解石玻纤+叶片壳。约在泥盆纪前后,古腹足目和翼形亚纲某些超科的文石柱纤-柱层纤外层变为方解石柱状外层。随后在石炭二叠纪,文石交错纹层也开始变为方解石交错叶片层,如扇贝、铄蛤和牡蛎3超科。

**4.4 脊椎动物蛋壳** 龟鳖目和有鳞目蛋壳全由文石球纤组成,比较原始。鳄目蛋壳文石球纤已退化,互不相连,主要由放射柱状层组成。恐龙类和鸟类蛋壳由文石球纤-方解石放射柱状层和正柱状层组成,后两者分别具柱纤和柱层纤残余,有时还具薄层纤表层。在突胸超目中,中正柱状层比平胸超目更为发育。

**4.5 哺乳纲牙齿釉质层** 在二三叠纪似哺乳类中呈对称柱纤结构;在晚三叠世和早侏罗世原始哺乳动物中呈不对称柱纤;在白垩纪初期低级兽类中呈半柱纤,并出现再生棱柱雏晶。以后棱柱雏晶发生螺旋形延伸,形成玻柱结构。

## 5 接触关系

**5.1 纤状结构** 在黄花鱼耳石中由内向外可见球纤→柱纤→柱层纤→层纤的过渡关系。在鸚鵡螺口部可见外柱纤薄层夹于微粒表层与珍珠主层间,柱纤尖端伸入微粒表层,从顶端球纤→柱纤→柱层纤→珍珠层完全为过渡关系。

**5.2 珍珠结构** 在夜光蝶螺中也可见到柱纤结构经柱层纤过渡为柱状珍珠结构。柱状和层状珍珠层常与纤状(柱纤-柱层纤-层纤)共生,并在光性和形态上近似柱层纤和层纤。

**5.3 交错纹结构** 交错纹纤结构在结构上类似柱纤-柱层纤结构,并可以它们作外层。在有些腹足类,如榭果螺,存在着交错纤状结构作为柱层纤与交错纹纤之间的过渡薄层。在掘足类正纤(层纤)外层与交错纹片中层之间常有很薄的交错纹纤层;内层为交错纹纤薄层。

**5.4 叶状结构** 有铍腕足类叶纤结构和无铍腕叶片结构都以层纤结构作为外层。鱼类鳞片 and 牙齿由釉质(玻柱纤)外层、齿质(叶纤)中层

和骨质(叶片)内层组成。

**5.5 交错叶片结构** 结构构造形态类似交错纹,并都是以交错纹(纤或片)作为内层。

**5.6 柱状结构** 形态与柱纤和柱层纤结构类似,珍珠贝柱状层底部具柱纤结构残余薄层,鸟类蛋壳柱状层中存在着柱纤和柱层纤结构残余,哺乳纲釉柱中有半柱纤结构。

## 6 结 论

**6.1 点型(粒状)结构**为无胚层生物的主要结构类型,胶结结构比粒状更原始,线型(纤状)为二胚层动物的主要结构类型,面型(片状)仅为三胚层动物的主要结构类型,体型(单晶)为棘皮动物唯一结构类型,玻纤(螺旋)为节肢动物主要结构类型,珍珠层、交错纹和再生结构为软体动物主要结构类型。

**6.2 一类生物的主要生矿体结构**,在较高等生物的低级生物类型、低级生矿体、幼年期壳或早生层中可以保留;但在较低等生物要在高级生物类型、高级生矿体或晚生层中才能出现。在同等生物门类中,磷质生矿体结构类型低于钙质生矿体,而高于硅质生矿体。

**6.3 点型和体型结构的演化为胶结→隐粒→微粒→单晶微粒→单晶**。线型结构的演化为

隐微粒→不规则纤状→球纤→柱纤→柱层纤→层纤→玻纤(螺旋形)。面型(片状)为多源成因。珍珠结构由文石柱层纤一层纤变来,交错纹(纤→片)由文石柱纤—柱层纤经文石交错纤状变来。叶状(纤→片)由方解石层纤或玻纤演化而来。交错叶片结构由原始交错纤状或交错纹(纤或片)变来,柱状结构由文石或碳磷灰石柱纤或柱层纤变来,晶粒结构由一切文石结构变来,玻质结构可由一切线型或面型结构变来。

## 参 考 文 献

- 1 戴永定. 生物矿理学. 石油工业出版社, 1994. 572.
- 2 Bandel K. Transition from simple structural types to the crossed-lamellar structure in gastropod shells. *Biom mineralization*, Band 10, 1979, 9—30.
- 3 Horowitz A S, Potter P E. *Introductory Petrography of Fossils*. Berlin: Springer-Verlag, 1971. 302.
- 4 Kobayashi I, Mutvei H, Sahni A. *Structure, Formation and Evolution of Fossil Hard Tissues*. Tokyo Tokai Univ. Press, 1993, 214.
- 5 Majewske O P. *Recognition of Invertebrate Fossil Fragments in Rocks and Thin Sections*. Leiden: E J Brill, 1969, 101.
- 6 Watabe N. Crystal growth of calcium carbonate in the invertebrates. *Prog. Crystal Growth Charact.* 1981, 4, 99—147.