

The cover features several overlapping circular medallions, each containing a detailed blue line drawing of a different fossil specimen, such as trilobites, brachiopods, and other marine organisms. These medallions are arranged diagonally across the page, framing the title.

# 化石岩石学

国家地质局  
总局

第二普查勘探大队实验室 组印

1977.5

# 化石岩石学

中国科学院地质研究所  
七室碳酸盐岩组

## 编 后 说 明

化石岩石学（初稿）承国家地质总局第二普查勘探大队的热情组印，广大石油地质工作者的大力支持，终于和大家见面了。我们希望这本小册子将有助于石油地质、沉积矿床、沉积岩石学和岩相，以及古生物工作的深入发展，并为普查勘探十来个大大庆油田作出微薄的贡献。

遗憾的是原有的 180 张图片，因无详细描述，未能附上一起出版，准备等详细描述后，再请二普联系制铜版，内部出版。

应当指出，本书仅是初稿，内错误很多仅供同志们参考。我们准备明年重新编写“化石岩石学”，争取八〇年前出版，作为三十周年大庆献礼。为此还需进一步补充材料，增添内容，修改结论。希望有关专业工作者能严格地审查本书，详细地进行补充和修正。也希望广大读者提出宝贵的批评和意见。以便使我们的重新编写工作进行得更顺利。

一本岩石学专著必须附有一批清晰明亮而能说明问题的图片，“化石岩石学”的图片，牵涉各种门类，要 500 张以上。因此我们急需一批各种类型的生物岩和骨屑（生物碎屑）岩，以及比较稀少的现代和古代生物硬体标本，以便切制薄片，摄制图版。

生物岩和骨屑（生物碎屑）岩要求质纯，生物堆积紧密，破碎不刷，生物门类比较单一。化石标本最好带有围岩或包围于围岩中。现代生物硬体标本要求去掉软体。

标本要求注上名称、产地、时代、层位、采集人、产状。邮寄地址为北京 634 信箱，请有关单位大力协助。

中国科学院地质研究所

七 室 碳酸岩组

## 组 印 序

一声惊雷震天地，六亿神州开新宇。

英明领袖华主席，取得了一举粉碎了王、张、江、姚篡党夺权阴谋的伟大胜利。在华主席的抓纲治国伟大方针指引下，我们坚决响应以华国锋主席为首的党中央的号召，掀起学习马列著作、毛主席著作的新高潮，狠抓革命，猛促生产，争取早日实现毛主席在“西南地区光搞煤不成，要搞点石油搞点气”和华主席最近提出的“要在本世纪内建设起十来个象大庆这样规模的大油田”的光辉指示。为此，我们特组印了这部《化石岩石学》专著。

《化石岩石学》专著，是中国科学院地质研究所七室碳酸岩组的同志们，遵照毛主席：“中国将变为一个强大的社会主义工业国。中国应当这样。因为中国是一个具有九百六十万平方公里土地和六万万人口的国家，中国应当对于人类有较大的贡献”和“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平”的教导，在所党委和室支部领导与关怀下，排除了“四人帮”对科技界的干扰和破坏，经过多年的生产实践与理论研究所获得的可喜成果，是对我国研究化石岩石学方面的贡献。

《化石岩石学》论理清晰，简明扼要，内容极为丰富，是我队石油地质工作者和广大地质工作者的一部值得很好学习和参考文献。

《化石岩石学》，由总论：生物化石钙质结构的分类与演化；各论：生物化石各门类的分述两部分组成。我们组印此著，是征得了编著者的同意的。

由于我们业务水平较低，缺少组印经验，故缺点、错误难免，敬希读者指正。

对北京中国历史博物馆范曾同志，为此专著撰书了封面文字；四川石油管理局地质综合研究大队张荫本同志为此专著设计画绘了封面图案。借此，深表谢意。

承蒙重庆嘉陵印制厂在百忙中，给予以积极排版印刷，表示热忱的感谢。

国家地质总局第二普查勘探大队实验室

一九七七年五月

# 目 录

## 总论: 生物化石钙质结构的分类与演化

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 绪 言                   | (1)  |
| (一) 生物化石钙质结构研究的目的和意义  | (1)  |
| (二) 生物化石钙质结构研究的发展和现状  | (1)  |
| 第一节 生物化石矿物成分          | (2)  |
| 第二节 生物化石钙质结构的分类       | (4)  |
| 第三节 生物化石钙质结构的演化       | (10) |
| (一) 生物化石钙质结构系统演化      | (10) |
| (二) 各门类生物化石钙质结构演化     | (11) |
| (三) 个体发育过程中硬体结构的演化    | (12) |
| (四) 生物钙质结构在空间上和时间上的顺序 | (13) |
| 第四节 钙质生物骨骼形成作用        | (16) |
| (一) 钙质生物造骨方式          | (16) |
| (二) 钙质生物造骨组织          | (17) |
| (三) 钙质生物造骨机理          | (18) |
| 结 论                   | (20) |

## 各论: 生物化石各门类的分述

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第一章 钙质藻类                 | (22) |
| 一、兰藻门(Cyanophyta)        | (22) |
| 二、红藻门(Rhodophyta)        | (23) |
| 三、金藻门(Chrysophyta)       | (24) |
| 四、绿藻门(Chlorophyta)       | (25) |
| 五、轮藻门(Charophyta)        | (26) |
| 第二章 原生动物门(Protozoa)      | (27) |
| 一、鞭毛纲(Mastigophora)      | (27) |
| 二、纤毛纲(Ciliata)           | (27) |
| 三、肉足纲(Sarcodina)         | (27) |
| 第三章 海绵动物门(Porifera)      | (31) |
| 第四章 古杯动物门(Archaeocyatha) | (32) |
| 第五章 腔肠动物门(Coelenterate)  | (33) |

|                                                 |             |
|-------------------------------------------------|-------------|
| 一、水螅纲 (Hydrozoa) .....                          | (33)        |
| 二、珊瑚纲 (Anthozoa) .....                          | (34)        |
| <b>第六章 苔藓动物门 (Bryozoa) .....</b>                | <b>(36)</b> |
| <b>第七章 腕足动物门 (Brachiopoda) .....</b>            | <b>(37)</b> |
| <b>第八章 软体动物门 (Mollusca) .....</b>               | <b>(41)</b> |
| 一、锥壳纲 (Cricoconarida) .....                     | (41)        |
| 二、双神经纲 (Amphineura) .....                       | (42)        |
| 三、腹足类 (Gastropoda) .....                        | (42)        |
| 四、掘足类 (Scaphopoda) .....                        | (44)        |
| 五、瓣鳃纲 (Lamellibranchiata) .....                 | (45)        |
| 六、头足类 (Cephalopoda) .....                       | (49)        |
| <b>第九章 环节动物门 (Annelida) .....</b>               | <b>(52)</b> |
| <b>第十章 节肢动物门 (Arthropoda) .....</b>             | <b>(53)</b> |
| 一、三叶虫纲 (Trilobita) .....                        | (53)        |
| 二、甲壳纲 (Crustacea) .....                         | (54)        |
| 三、肢口纲 (Merostomata) .....                       | (56)        |
| <b>第十一章 棘皮动物门 (Echinodermata) .....</b>         | <b>(56)</b> |
| 一、海百合纲 (Crinoidea) .....                        | (57)        |
| 二、海林檎纲 (Cystoidea) .....                        | (58)        |
| 三、海胆纲 (Echinoidea) .....                        | (58)        |
| 四、海参纲 (Holothuroidea) .....                     | (59)        |
| <b>第十二章 脊索动物门 (Chordata) .....</b>              | <b>(59)</b> |
| 一、海鞘目 (Ascidiacea) 骨针 .....                     | (60)        |
| 二、牙形石 (Conodonts) .....                         | (60)        |
| 三、鱼鳞片和真皮板 (Fish Scales and Dermal Plates) ..... | (60)        |
| 四、鱼耳石 (Otoliths) .....                          | (61)        |
| 五、牙齿 (Tooth) .....                              | (61)        |
| 六、骨头 (Bone) .....                               | (61)        |
| 七、蛋壳 (Egg shell) .....                          | (61)        |

# 总论：生物化石钙质结构的 分类与演化

## 绪 言

### (一) 生物化石钙质结构研究的目的和意义。

绝大部分无脊椎动物和藻类化石由碳酸钙组成。研究生物化石钙质结构是为了对化石进行正确鉴定和合理分类,探索古生物间相互的演化关系。沉积岩,特别是碳酸岩中含有大量的生物组份,研究其结构是确定岩石薄片内生物化石及其碎片类型的必要手段,在研究岩石、岩相和古生态时必需广泛采用。生物成因的骨屑灰岩、骨片灰岩和骨架灰岩,不但可以形成生油母岩;而且由于它们具有很大的原始骨内孔隙,因而造成石油、天然气和铁、锰、磷、镁、铅、锌、汞、铀等矿液的渗滤、交代和储集空间,形成巨大工业矿床。利用结构鉴别化石类型是研究生物成因灰岩,进行分类,确定成因的重要方法。

### (二) 生物化石钙质结构研究的发展和现状。

化石结构研究从十九世纪中叶显微镜应用于化石鉴定时就开始了,但是作为专题来研究还是本世纪的事。由于珍珠养殖事业的发展需要,从20年代就开始对瓣鳃类及其他软体动物的壳层结构进行研究。德国施米特(Schmidt 1921, 1923)首先用偏光显微镜对各种动物硬组织系统观察,提出较为完整的贝壳概念。接着丹麦毕吉德(Bpggild 1930)深入研究现代和古代软体动物,发表软体动物壳层结构专著,并提出结构分类。

从五十年代开始,各门类钙质生物硬体及其化石的结构研究得到广泛开展,特别是六十年代以来电子显微镜的普遍应用,使结构研究提高到新的超微水平。在各门类化石结构研究中应当提到:

英国伍德(Wood 1949)、美国洛布利克(Loeblich)和塔潘(Tappan 1964)、托(Towe)和西夫利(Cifflli 1967, 1963)对于有孔虫壳层结构的研究。

加拿大斯特恩(Stearn 1966)对层孔虫结构的研究。

我国王鸿楨(1950)、日本加藤(Kado 1963, 1968)、法国阿路瓦托(Alloiteau 1957)、美国索劳夫(Sorauf 1972, 1975)对于珊瑚结构的研究。

美国博德曼(Boardman 1960, 1966, 1969)、英国塔弗纳—史密斯(Tavener—Smith 1968, 1969, 1972, 1973)、美国拉克(Rucker 1967, 1968)对于苔藓虫结构的研究。

英国威廉斯(Williams 1953—1972)对于腕足类壳层结构的研究。

美国威尔伯(Wilbur 1964, 1966, 1968)、奥伯林(Oberling 1955, 1964)、麦克林托克(Macclintock 1967)、泰勒(Taylor 1968, 1969)、日本和田(Wada 1958—1968)、西德厄尔本(Erben 1968—1975)、瑞士怀斯(Wise 1968, 1969, 1970)、瑞典马特维(Mutvei 1964, 1969, 1970, 1972)对于软体动物结构的研究。

美国莱文森(Levinson 1951, 1961)、英国巴特(Bate 1972)、丹麦约根森(Jørgensen 1970)对于介形虫壳层结构的研究。

美国劳普(Raup 1959—1967)、西德尼森(Nissen 1963, 1969)对于棘皮动物结构的研究。

西德斯米特(Schmidt 1943—1968)、厄尔本(Erben 1970)、英国蒂莱(Tyler 1945—1969)对于蛋壳结构的研究。

仅到六十年代末,为了满足石油勘探过程中沉积岩,特别是碳酸岩中生物鉴定的需要,才有综合性的化石结构著作问世,一本为美国马耶夫斯基(Majewske 1969)著的岩石和薄片中的无脊椎动物化石碎片的鉴定,一本为美国霍罗威茨(Horowitz)和波特(Potter 1972)合著的化石岩石学导论。

在研究生物硬体组织的矿物组成和形成机理过程中新兴起来一门生矿学(Biomineralogy),它以古生物化学中得到的生物体分子知识为基础。1970年7月,由厄尔本(Erben)主持在西德美恩兹召开第一次国际生矿学讨论会,发表40余篇论文,并成立生物雏晶研究委员会(Research Commission on Biocrystallites)不定期地发行“生矿化”(Biomineralization)杂志。

应当指出,在各门类化石结构研究中,结构命名和划分极其混乱。一般化石岩石学和沉积岩岩石学者仍沿用毕吉德(Bøggild 1930)以研究软体动物壳层结构为基础的结构分类,它远不适应各门类化石结构深入研究的现状。因此化石结构的合理分类系当务之需。它不但有助于化石碎片的正确鉴定,而且将为古生物,特别是低级的腔肠动物、古杯动物、海绵动物、原生动物和藻类植物的分类和演化提供新的证据。也是在震旦寒武系中寻找各门类古老钙质化石分子的有效方法。

## 第一节 生物化石矿物成分

生物硬体主要可分为钙质(无脊椎动物)和磷质(脊椎动物)两大系列。有机质硬体在各门类中普遍存在,硅质硬体较少。现分述之:

(一) **钙镁碳酸盐:**组成无脊椎动物和藻类植物化石的主体。脊索动物限于海鞘骨针,脊椎动物限于爬行类和鸟类的蛋壳、鱼类耳石。

主要为低镁方解石( $\text{MgCO}_3 < 4\text{mol}\%$ )、高镁方解石( $\text{MgCO}_3 > 4\text{mol}\%$ )和文石( $\text{MgCO}_3 < 1\text{mol}\%$ 斜方晶系)。后两者极不稳定,在生物死后和埋藏时极易转化为低镁方解石,故在中、古生代碳酸岩中少见。文石与方解石不同存于同一壳层或同一部分,除非两者互相转化时。高镁方解石常见于棘皮动物和红藻,以红藻含镁最高,文

石常见于软体动物和绿藻中。

前寒武纪低等藻类化石由白云石组成,但原始沉积时可能为无序方解石,即原白云石(Protodolomite)。其组成为 $\text{MgCO}_3 \sim 43\text{mol}\%$ 。

(二) **钙磷酸盐**: 组成脊椎动物和牙索动物(Conodontochordata)化石主体。主要矿物为胶磷矿,还有碳磷灰石、细晶磷灰石和氢氧磷灰石。后三者常由胶磷矿转化而来。根据明岑贝尔格(Münzenberg, K.J., 1970)对脊椎动物骨头矿物的结晶学研究,发现除磷灰石外,还有少量透钙磷石( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )和磷酸八钙( $\text{Ca}_8\text{H}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )。无铰纲(腕足动物)、多毛纲(环节动物)的大多数属,三叶虫纲和甲壳纲(节肢动物)的一些属,原生动物、腔肠动物、苔藓动物和软体动物的少数属由磷质组成。

(三) **二氧化硅**: 生物活着时,硬体组成为蛋白石,死后进入埋藏,才逐渐经过玉髓变为石英。为低等生物的造骨矿物,如硅藻、硅质海绵、硅质鞭毛虫、放射虫、太阳虫等。

(四) **有机化合物**: 主要为造骨的有机基质(Organic matrix),呈致密隐粒暗色膜包于壳的外表面,并分布于硬体中。在某些生物硬体中作为主要的造骨矿物,尤以节肢动物最发育,在其他门类中都有分布。在无脊椎动物化石中主要有:

几丁质(包括类几丁质) Chitin  $\text{C}_{15}\text{H}_{25}\text{O}_5\text{N}_2$

壳质(壳蛋白) Conchiolin  $\text{C}_{30}\text{H}_{28}\text{O}_{10}\text{N}_2$

海绵丝(海绵硬肌) Spongin

在脊椎动物中还有胶原(也见于棘皮动物)和似角朊。

生物硬体的矿物成份受其遗传性和生活环境(物理和化学条件)控制,在生物死后和埋藏时发生变化。除重结晶作用外,还发生置换作用(离子析出),如高镁方解石变为低镁方解石;晶格转化,如文石转化为低镁方解石,蛋白石转化为玉髓以至石英,胶磷矿转化为碳磷灰石、细晶磷灰石和氢氧磷灰石。由于水溶液的作用,在沉积及其后不同阶段,生物硬体中的原生矿物,包括一部分有机质,可被石英、方解石、白云石、天青石、重晶石、萤石、滑石、甚至磁铁矿等其他矿物所交代。但有些人认为天青石、重晶石、磁铁矿等也存在着生物成因。

生物硬体矿物成分受环境演化很大影响。在前寒武纪多分泌原白云石和蛋白石,与沉积物相似。如10亿年前发生的红藻分泌原白云石,6.4亿年前(南方震旦系陡山沱组)的硅质海绵骨针。这与当时大气圈二氧化碳分压比现在高100倍以上,水圈中 $\text{Mg}/\text{Ca}$ 离子比率比现在大得多以及大量的火山喷发有关。到震旦纪晚期,具硬体的无脊椎动物各门类,除棘皮动物(下寒武世晚期发生)和苔藓动物尚未发现外,在那时都已出现软体。由于基性风化母岩中磷的溶出和火山喷气磷的带入,使冰盆地中积聚大量磷酸根离子。当大气圈中 $\text{CO}_2$ 分压降低,水体中碳酸含量减少,PH值增加呈中性,使水体中磷酸钙过饱和而沉淀,形成富磷的地史时期。处于当时发展水平最高的三叶虫、软舌螺和无铰腕足类都简单地汲取、排泄和分泌磷酸钙,形成自己的硬体。也可能由于磷化合物的催化作用,形成不溶于碳酸的有机质(如几丁质)壳。因而磷质壳层与几

丁质壳层密切共生，形成交替互层。相反，磷酸盐化合物对钙化作用起阻碍作用，因而磷质壳层从不与钙质壳层共生。

仅到早寒武世初，氧气增加到现代的1%，CO<sub>2</sub>分压进一步降低。水圈中硫酸盐和钙离子大为增加，碳酸含量降低，PH值继续增加。在有机质的催化和保护下，方解石才能沉淀下去，而不被碳酸溶蚀掉。文石和高镁方解石硬体虽然出现比低镁方解石稍晚，但在早寒武世晚期也都已出现，而后来愈来愈发育。

自寒武纪以后，海水PH值继续增加，磷酸根离子浓度大为减少，使磷质外骨骼发育受到限制，其统治地位到奥陶纪已完全被钙质硬体代替。只有早寒武世发生的牙索动物和奥陶纪发生的脊椎动物，它们已转化为内骨骼，并获得高级的生理分泌方式，因而在不利条件下，仍然获得广泛的发展。

在个体发育阶段中，某些生物硬体矿物成分亦可改变。如某些钙壳瓣鳃类，其幼体胚壳由碳磷灰石组成。某些瓣鳃类，如贻贝(*Mytilus*)，其外层为方解石，内层为文石。某些瓣鳃类，如椭圆蚌(*Elliptio*)，用方解石医治其文石壳的损伤。

在不同环境中，同属种的生物硬体矿物成分亦可变化，在由方解石层和文石层组成的生物中，如扇贝(*Pecten*)和龙介(*Serpulid*)，其文石含量随温度升高而增加，方解石中镁的含量也相应增加。

因此，生物硬体矿物成分的演变直接受到其所处环境——水圈、大气圈、岩石圈演变的影响。同时也受生物进化因素的控制，要求坚固、灵活、轻便的骨骼以适应生存竞争，防护伤害，或支持软体迅速运动。

图1. 生物硬体矿物组成分布图；

## 第二节 生物化石钙质结构的分类

化石结构指组成晶体和晶体组的形状、大小、排列方向(定向)及其相互关系。我们按方解石(或文石)晶体的空间形态，即点、线、面、体四种类型，分成粒状、纤(柱)状、片状、单晶四大结构类型。然后再按晶体大小和排列方向(定向)等特征加以细分。

### (一) 粒状结构：

由光性方位杂乱，三向大致等轴的方解石(或文石)几何体组成。它是低等生物，如藻类植物、原生动物、海绵动物、古杯动物的主要结构类型，也广泛发育于腔肠动物，在苔藓虫、腕足类和软体动物的最外层或胚壳中也有分布。但次生的晶粒结构却广泛分布于各种生物中。

按成因和颗粒大小分四种：

#### (1) 胶粒结构，或称粘结(agglutinated)结构。

由微晶方解石、胶结稍大的方解石、石英粉砂、碳酸盐粒屑、骨屑而成。仅见于最低等生物，如兰藻、红藻、钟纤虫(*Tintinnines*)、低级有孔虫(如砂盘虫超科(*Ammodiscacea*))，还有某些多毛类(*Polychaete*)蠕虫，如扫毛虫(*Sabellarians*)。

(2) 隐粒结构, 相当于篷的致密层(tectum)。

由 $<0.5\sim 1\mu$ 的方解石(或文石)颗粒组成, 常伴生较多有机质, 在一般岩石薄片着色不透明。常组成兰藻、红藻、金藻、甲藻(鞭毛虫)的细胞壁, 有孔虫外层, 某些海绵体壁, 古杯和腔肠动物中也经常见到。

一般瓷质(porcellaneous)结构, 颗粒极细, 与隐粒结构相当。但有孔虫的瓷质结构不是粒状。根据哈克(Haake 1971)用扫描电镜对小粟虫(Miliolid)的瓷质壳壁观察结果, 发现由长 $1\sim 2\mu$ , 宽 $0.15\sim 0.3\mu$ 的针状方解石, 二向或三向杂乱排列而成。绿藻原生沉淀壳也由不规则排列的文石针组成。

(3) 微粒结构:

由 $1\sim 5\mu$ 方解石颗粒组成, 色稍浅, 微透亮。常组成藻类细胞壁、有孔虫内层、海绵体壁和骨针、古杯体壁, 腔肠动物和窄唇纲苔藓虫中也广泛发育。裸唇纲苔藓虫和其他较高级无脊椎动物最外层, 或胚壳层都有过微粒结构, 位于壳质层(periostracum)之内。它和壳质层一起在化石中难以保存, 有的在成年期就消失了。在内卷虫超科和瓣超科中, 微粒呈线状排列, 具纤状或蜂巢状面貌。在曲板古杯和某些庭中, 由于分泌速度有时减慢, 产生颗粒稍大, 略显定向的薄壳层, 比较透亮, 形成长层构造。在古杯和庭中生物成因的次生加厚物也呈微粒结构。

(4) 晶粒结构:

由 $>5\mu$ 的亮晶方解石镶嵌而成。其成因多由文石转化。常见于绿藻、软体动物、四射珊瑚、水螅等原生硬体为文石质的古生物化石中。海绵体壁和大骨针多为晶粒结构, 可能也由文石变来。由于微粒、纤状和片状结构的强烈重结晶作用, 以及孔隙次生充填, 也可以产生晶粒结构, 但颗粒不如文石变来的均一。

(二) 纤(柱)状结构:

由平行或放射排列、单向延长的方解石(或文石)晶体组成。除柱状外, C轴与长轴近乎一致。为腔肠动物、节肢动物(钙壳)、轮藻藏卵器的主要特征。某些苔藓虫(如泡孔目Cystoporate)、某些腕足类(如五房贝亚目Pentameracea)、某些有孔虫(如轮孔虫亚目Rotallina)也非常发育。有铰腕足类、裸唇纲苔藓虫和软体动物的外层也有呈此结构。还有腕足类和瓣鳃类等的肌泌层、头足类的房室和体管沉积物、箭石鞘(belemnoid rostrum)、鱼耳石, 以及爬行类、鸟类蛋壳等。按其晶体大小和形状分为纤状、玻纤和柱状。

(1) 纤状结构: (图2)

方解石(或文石)晶体两短轴远小于长轴, 大约宽 $<3\mu$ , 长在四射珊瑚中为 $50\sim 500\mu$ 。根据索劳夫(1974)资料, 在扫描电镜图象中可见现代千孔螅(Millepora alcornis)文石纤体宽约 $0.5\mu$ , 长约 $5\sim 6\mu$ 。纤状为腔肠动物硬体的主要特征, 在苔藓虫、腕足类、介形虫、耳石、蛋壳和软体动物外层均有分布。纤体一般多从隐粒结构组成的生长基础上生长。按其生长基础的几何形态, 可分层(面)纤、柱(线)纤和球(点)纤三和柱(曲)层纤四种。

1. 层(面)纤结构: 相当于王鸿祯研究四射珊瑚时划分的羽层状(fibro-lamellar)

和毕吉德划分的正柱(normal prismatic)结构。

纤体多垂直于基面,随基面弯曲而改变方向,因而加藤称之为正纤(fibro-normal)。但也有斜交的,交角可恒定或逐渐变化。在一四射珊瑚中,体壁可以正交,隔壁可以斜交。在同一隔壁中,靠体壁处斜交,近中心处正交;或内层斜交,外层正交。在纵切面中,单偏光下纤体与下偏光垂直时界线清晰,正交偏光下转动载物台时呈前进波状消光。在横切面中,纤体呈微粒状,但似均质、透亮、呈不均一波状消光,可与微粒结构相区别。有时由于纤体的阶段性生长,形成层状构造,在床板珊瑚和某些早期四射珊瑚中特别发育。层纤结构常见于珊瑚、层孔虫、介形虫、泡孔目苔藓虫和某些腕足类以及苔藓虫、腕足类、瓣鳃类、腹足类、头足类和洞足类的外层。某些有孔虫,如似节房虫(Nodosinellidae)、古串珠虫科(Palaeotextulariidae)、轮藻藏卵器和瓣鳃类的厚壳蛤(Rudist)也呈此结构。层纤结构多由方解石组成,也有文石组成。

2. 柱(线)纤结构:(图3)相当于王鸿祯研究四射珊瑚时划分的羽楣(tracular)结构和毕吉德划分的复柱(complex prismatic)结构。(图4)

纤体沿基线向外向上生长,多呈束状或喷泉状,即抛物线状。开始近乎平行基线,然后逐渐向外角度变大,到边缘近乎垂直,但也有呈斜线或垂直线的。柱纤之间相互嵌结,界线不清。生长基线的粒状结构也可因重结晶作用而消失。柱纤结构纵切面呈长条形,显前进波状消光;横切面呈圆形或多边形,显十字消光(图4)。它主要发育于轮藻藏卵器、水螅、六射珊瑚、刺毛虫、层孔虫和瓣鳃类、腹足类个别科属的外层。某些四射珊瑚的隔壁和刺隔壁(即全羽楣rholocanth)为柱纤结构,而在复羽楣(rhabdacanth)中,组成柱纤的纤体本身为次一级的柱纤,因而也可称为复柱纤。柱纤结构一般多由文石组成,但也有方解石组成。

3. 球(点)纤结构:(图5)相当于王鸿祯划分的羽簇(fibrous fascicles)结构。

纤体沿基点(即钙化中心)向周围放射生长,直至球纤之间相互嵌结为止。球纤可进一步分为全球纤和锥球纤。在任何切面中呈圆形或扇形断面,显放射状十字消光。扇形断面仅见于锥球纤中。球纤结构主要发育于中新生代的水螅,蛋壳的乳突和某些六射珊瑚中。根据法国阿路瓦托(1959)素描的图版资料,六射珊瑚的卡多维形星珊瑚Morphastrea cudoviciana为球纤结构。球纤多由文石组成。某些古老的红藻也有此种结构,由方解石或原白云石组成。

在四射珊瑚隔壁研究中,由羽簇组合为羽楣,羽楣组合为羽扇,羽扇发展为隔壁的概念是值得怀疑的。四射珊瑚隔壁与六射珊瑚隔壁有很大区别,前者以层纤为主,生长基础为曲折面;后者以柱纤为主,生长基础为曲折线。球纤(羽簇)不能组合成为柱纤(羽楣),柱纤也不能组合成为层纤(羽层)。虽然它们之间存在着过渡和演化关系,但它们的生长基础不同。

4. 柱(曲)层纤:(图6)纤体沿基点向一个方向辐射生长。由于纤体生长的周期性

[注] 此属已废,并入灌木星珊瑚(Thamnaasteria)。

因而产生层纹。它沿一方向连续生长可以形成柱状。但它和柱纤不同,没有生长基线,也与层纤不同,弯曲度很大,柱(曲)层纤在横切面也呈十字消光,在纵切面上呈放射消光。柱(曲)层纤相当于毕吉德划分的合柱(composite prismatic)结构(图7)。在头足类、瓣鳃类和腹足类外层比较常见。

(2) 玻纤结构:相当于毕吉德划分的均质柱状(homogeneous prismatic)结构(图8)。

纤体宽 $<0.5\mu$ ,垂直壳面,随壳面的平坦或弯曲而作平行或放射排列。在单偏光下透亮,因富含有机纤维而呈浅棕黄色,当放大500倍时也难以分辨纤体。在正交偏光下,呈均匀的波状消光,根据消光方位辨别纤体方向。在弯曲很复杂的三叶虫碎片任意切面中,这种消光非常显著。玻纤结构是节肢动物钙壳的主要特征,三叶虫和大部分介形虫呈此结构。在有孔虫中,轮孔虫亚目绝大部分科,如节房虫科(Nodosariidae)、货币虫科(Nummulitidae)等外壳呈玻纤结构,即玻璃放射壳(Hyaline radial test)。此外,见于腹足类的异足目(Heteropoda)和翼足目(Pteropoda),锥壳纲(Cricoconarids)的光壳节石(Stylioline),瓣鳃类个别科的外层或内层,如贻贝科(Mytilidae)外层,头足类某些科也有。玻纤结构多由方解石组成,仅在腹足类、瓣鳃类和头足类中有文石组成。

(3) 柱状结构:(图9),相当于腕足类的棱柱(prismatic)结构。

方解石(有时为文石)柱体宽 $5\mu$ 以上,延长度远较纤体为小,断面呈正方形或多边形,长轴垂直或倾斜于壳面。柱体C轴方位不一,以柱体为独立消光单位。有的柱体不规则,可向粒状过渡。

除细小的柱状组成某些软体动物和腕足类的外层外,一般主要组成腕足类、瓣鳃类、腹足类、掘足类的肌泌层(myostracum)。位于肉茎和肌肉吸附区及外套膜线。仅在某些腕足类内层,如五房贝亚目和一部分石燕贝亚目;某些瓣鳃类外层,如珍珠贝科(Pteriidae)、迭瓦蛤科(Inoceramidae)、江瑶科(Pinnidae)和扇贝科(Pectinidae)右壳;某些腹足类外层,如笠贝科(Acmaeidae)、骨螺科(Muricidae)等作为主要壳层出现。

关于内部柱状层的成因,一般认为,在片状层停止分泌,片间有机纤维破裂,因而分泌粗的棱柱。特别在肉茎和肌肉吸附张力作用下,更易使片间有机纤维破裂,分泌生长延向与张力一致的晶体,柱内保留有横向细层纹。在电子显微镜下可见文石柱内含有有机层纹,而且纵向上也被分散的纵向线分成块,相当于珍珠结构,方解石柱也有类似现象。这更证实内部柱状结构由片状结构变来,是老年期的特征,对外壳起加厚作用。但外部柱状层的成因完全不同。

### (三) 片状结构:

由近乎平行、两向或单向延长的方解石(或文石)晶体,以各种方式迭积而成。除珍珠结构外,其他片状结构C轴均包含于小片中,但方位不一。片状结构常见于软体动物、腕足类、苔藓虫和蠕虫(龙介)管中,按小片叠积方式可分平行片状、倾斜片状、交错纹片、复杂交错纹片和珍珠片状五种。

### (1) 平行片状结构: (图10)

根据扫描电镜资料,可由厚小于 $1\mu$ 的方解石小片或直径小于 $1\mu$ 的方解石纤维水平迭积而成。由小片组成的片状结构按生长方向可分叠积生长与螺旋生长两种型式。叠积生长型比较普遍,腕与方解石交替分泌。常见于裸唇纲苔藓虫、扭月贝目腕足类和某些软体动物中。据英国威廉斯(1970)发表的上奥陶统有铰纲腕足类异常小加塞贝(*Gacella insolite*)资料小片厚 $1\mu$ ,宽 $5\mu\pm$ ,长 $10\mu\pm$ ,美国泰勒(1969)发表的扇贝超科(复型)资料,小片厚 $0.1\sim 0.5\mu$ ,宽 $2\sim 3.5\mu$ ,长 $4\sim 17\mu$ 。螺旋生长型其腕与方解石是同时分泌的,为无铰纲腕足类和窄唇纲苔藓虫的特征。根据瑞典布鲁诺(Brood 1973)发表的古生代环口目苔藓虫琴苔藓虫(*Sagenella Consimulis*)资料,小片厚 $0.5\sim 1\mu$ ,长 $50\mu$ ,宽比长小数倍。据英国威廉斯(1972)发表的无铰纲腕足类阿纳马拉髯葜贝(*Crania anomala*)资料,小片厚 $0.25\sim 0.30\mu$ ,直径 $15\mu$ ,片间夹 $0.01\mu$ 厚的腕。这些小片侧向连接,形成延伸很长的大片,平行于壳面或外形。片间含腕膜较少。在单偏光下,特别是片面与下偏光垂直时色暗,片密集。在正交偏光下,仅在垂直切面上可出现波状消光。由纤维水平排列组成的片状结构,见于大部分(除扭月贝目外)有铰纲腕足类和某些裸唇纲苔藓虫硬体中。纤维直径约 $1\mu\pm$ ,在腕足类壳垂直放射纹的切面中可见纤维断面呈矩形、菱形或刀片形。平行片状结构常见于苔藓虫、腕足类、蠕虫(龙介)栖管和锥壳纲中,为这四类生物壳层的主要特征。在腹足类和瓣鳃类的中层或外层偶尔见到。

### (2) 倾斜片状结构

由厚 $1\mu\pm$ (或宽 $1\mu\pm$ ),同向倾斜的方解石小片(或纤维)迭积而成。片斜交壳面或骨骼外形,但常与上覆平行片状层的片相接,倾角逐渐变化,其倾斜方向与生长方向一致。在单偏光下色浅,片稀疏,弯曲不规则,延伸较短。常见于龙介科栖管外层、扭月贝目(*Strophomenida*)腕足类和隐口目苔藓虫内层,以及瓣鳃类和腹足类的个别科属中层。在牡蛎壳中迭积方解石小片倾斜相反,呈交错片状结构(图11)。

### (3) 交错纹片结构: (图12)相当于毕吉德划分的交错纹(crossed-lamellar)结构。

纹由 $<1\mu$ 厚的小片条平行迭积而成,呈楔形或板状,厚 $4\sim 40\mu$ ,宽与壳层厚度一致,长达数毫米。纹大多数倾斜层(壳)面,但也可以近乎直立或平行。纹大多数弯曲,两端与层(或壳)面平行尖灭;但也可以平直,两端与壳面斜交(如某些腹足类)。小片条以一定角度与层(或壳)面相交。同一纹中小片,其C轴方位一致,在正交偏光下以纹作为独立消光单位。两相邻纹的小片倾斜方向相反,两相隔纹的小片排列方向相同,消光位一致(图13)。小片可由文石针或小片条平行排列组成。据西德黑斯(Haas)发表的多板目(polyplacophora)扫描电镜资料,(图14)文石针宽 $0.3\sim 1\mu$ ,长 $5\sim 15\mu$ ,C轴(垂直壳面)相当于层纹中间轴,b轴相当于层纹水平短轴,a轴相当于层纹水平长轴。该结构多由文石针组成,方解石组成者很少。仅见于软体动物中,常组成腹足类、掘足类、瓣鳃类和双神经类(*Amphineura*)和软舌螺的中层和内层,构成壳层主体。

### (4) 复杂交错纹片结构: 相当于毕吉德划分的复杂交错纹(complex crossed-

lamellar) 结构。

纹形状不规则, 无一定规则界线, 组成纹的小片条光性方位也不一致。即使同纹的切面也显示交错性。在正交偏光下任一切面的任何部分均显不规则消光。该结构仅见于某些瓣鳃类内层和腹足类个别科属的内层和中层, 以及某些腹足类螺环的内部衬填物。多由文石组成, 方解石组成者罕见。

#### (5) 珍珠 (Nacreous) 片状结构: (图15)

由厚 $<1\ \mu$ 的文石片组成。根据怀斯 (1970) 发表的软体动物珍珠层扫描电镜资料, 文石小片厚 $0.3\sim 1\ \mu$ , 宽 $5\sim 10\ \mu$ , 开始呈六边形或圆形, 椭圆形, 在生长过程中逐渐扩大, 联成一大片。其生长方式可以呈迭积生长 (乳与文石交替分泌) 或迭锥生长 (乳与文石同时分泌)。根据马特维 (1972) 发表的现代鹦鹉螺壳层资料, 其珍珠片由文石针垂直排列组成, 文石针又由文石小粒垂直排列组成, 文石针与小粒的直径为 $0.1\sim 0.2\ \mu$ 。由于文石针沿a轴平行排列, 因而形成片条。文石片或平行于壳面, 或平行于生长线, 其C轴与片垂直而与其他片状结构不同。珍珠层在单偏光下透明均匀, 在正交偏光下呈现大面积的一致消光。珍珠层含有机质很高, 其文石小片间夹有机薄膜, 厚度均匀, 隔若干片出现较厚的暗色有机膜, 呈水平层纹。小片横向联结处也有有机膜分离, 其上下一致, 往往可垂直延伸很远, 甚至达整个层, 并易于裂开, 形成垂直节理或横裂纹。横裂纹可将珍珠层分割成柱状, 每一柱体为独立的消光单位。再加上水平层纹, 把柱体再切成许多小方块。该结构为高级软体动物的主要特征, 组成头足类壳层主体和某些瓣鳃类、腹足类的中层、内层。珍珠主要由这种结构组成, 但有些由玻纤结构组成。

#### (四) 单晶结构: (图16)

骨片的全部或局部由一致消光的单一晶体或双晶组成, 但根据尼森 (1963) X射线分析结果认为, 消光一致的晶体实际上是由一般偏光显微镜下看不到的晶粒组成。有时在好的偏光显微镜下可见晶粒大小在 $1\ \mu$ 以下。其C轴几乎完全平行排列, 而a轴排列方向也只有几度之差。单晶结构为棘皮动物的主要特征。个别软体动物种属、个别海绵骨针和盘旋虫科 (Spirogonidae) 有孔虫见有单晶, 也可能是晶粒结构重结晶而成。窗格台藓虫科虫室间壁、中棱和翁格达藻 (红藻) 细胞丝体也由单晶组成。按单晶形态可分连生、网格、薄壁三种。

##### (1) 连生单晶结构:

骨片由单晶方解石组成, 呈一致消光, 有时可见解理纹, 为海百合骨板的主要特征。但有时也可以为双晶或多个晶体组成。在茎板中c轴平行板面, 与茎沟一致。海百合活着时, 有机纤维呈网格状布满整个骨板, 并将骨板包裹和联结起来, 分泌而充填于有机网格中的方解石亦组成网格, 其光性在整个骨板中一致。海百合骨板原生孔隙高达50%, 死后有机网格纤维腐烂增加孔隙, 而原生方解石却逐渐次生长大, 减少并填满孔隙, 形成消光一致的单晶。有机纤维网格多被腐烂而消失, 残留有机质尘点, 但有时被保留, 特别在骨板边缘。有时孔隙被泥晶方解石充填。海参骨片和骨针与海百合相似, 亦为连生单晶。有机质网格或尘点、次生长大现象, 多孔隙引起的灰色色

调等, 这些特征都可与非生物成因的单晶相区别。

### (2) 网格单晶结构:

为海胆类骨板主要特征。它与海百合不同网, 格孔隙由外来单晶方解石次生充填。其C轴与原生单晶方解石C轴相互垂直。原生单晶方解石的C轴多为弦向, 也可以为径向。在头帕目(Cidaroida)的某些属中, 步带板C轴经向, 间步带板C轴弦向。在另一些海胆中, C轴方向在不同生长阶段可以改变。也有某些种C轴倾斜, 其倾角逐板而异。棘刺c轴方位一般与生它的步带板一致。

### (3) 薄壁单晶结构:

仅见于窗格苔藓虫科的群体丛(colonial plexus)、虫室间壁、中棱和红藻类翁格达藻(Ungdarella)的细胞壁(丝体)中。壁厚和丝粗仅 $10\mu\pm$ , 延伸较远。C轴平行壁和丝长轴或生长方向, 因而呈平行消光。但翁格达藻丝体细, 故在横切面及斜切面上显波状消光。薄壁单晶也由 $<1\mu$ 隐粒方解石组成, 其成因不明。

必须指出, 我们的结构分类是以晶体形态(即大小、形状、排列)为根据, 光学性质基本上与形态一致为前提。由于生物造矿作用是在有机质的包围和控制下进行, 因而决定光性的晶格形态也制约着晶体形态的发育。但自然界千差万别, 有时会发生矛盾: 1) 光性与形态的差异; 2) 不同类型仪器和方法引起的差异; 3) 不同放大倍数和分辨率的差异。因而对生物的结构类型和特征要用多种方法研究, 综合进行分析。

但是生物化石结构分类, 正象生物分类一样, 是在不断演化过程中形成。各个类型之间存在着过渡和交叉。如古串珠虫(有孔虫类)内层形态为微粒, 呈线形排列, 光性似层纤。小粟虫形态为纤状, 杂乱排列, 光性同隐粒。拟内沟珊瑚(Zaphrentoides)体壁形态似片状, 光性为层纤。某些裸唇纲苔藓虫, 大多数有铰腕足类如石燕贝(Spirifer)、五房贝(Pentamerus), 内层形态为纤状, 水平排列成片, 光性似片状。有的上二迭纪海百合形态似单晶粒状, 光性似玻纤。在棘皮动物骨片中除单晶外, 还有双晶、多晶, 介于晶粒与单晶之间。在现代牡蛎(Ostrea)中可见倾斜片状向交错纹片过渡。过渡结构为交错片状, 随着化石结构研究的深入, 这种发现会愈来愈多, 它必将为生物结构的演化提供丰富的证据。

图17 生物硬体钙质结构类型分布图

## 第三节 生物化石钙质结构的演化

生物硬体结构和软体一样, 存在着由低级到高级, 由小到大, 由简单到复杂, 螺旋式上升的演化历史。它们的发生、发展是生物与环境相互矛盾作用的结果。虽然有关生物硬体钙质结构演化的资料很零星, 但借用以研究软体为基础的生物演化规律来进行分析, 不难发现硬体的演化特征。

### (一) 生物化石钙质结构系统演化

当我们按照一般古生物学教程采用的无脊椎动物排列顺序,统计各种结构类型分布时,发现存在着由低级到高级的演化。

粒状结构是低等生物钙藻和原生动物(如有孔虫)、侧生动物海绵、古杯的主要特征。在腔肠动物(特别是水螅、层孔虫)和低级苔藓虫(如泡孔目)还有保留。在苔藓虫、腕足类和软体动物最外部壳质层下有些残留。

纤状结构是腔肠动物的特征,尤以珊瑚最为发育。在苔藓虫、腕足类和软体动物外层可以保留。在高级原生动物有孔虫发展的较高水平,似节房虫科内层和高等藻类——轮藻藏卵器外壳也开始出现。在某些腕足类和软体动物外层有的为细柱状,代替纤状。

片状结构是蠕虫管、苔藓虫、腕足类和软体动物的特征,简单的平行和倾斜片状结构多分布于前三类和低等动物——锥壳纲。在某些瓣鳃类和腹足类中层或外层还可见到。较复杂的交错纹片结构见于双神经(原软体)类、瓣鳃类、掘足类、腹足类和软舌螺,构成壳的主体。珍珠结构主要发育于头足类,瓣鳃类、腹足类的内层和中层亦可见。

内层柱状结构是由片状结构在肌肉吸附张力作用下演变的,位于片状结构层之内,贴近肌肉,主要是腕足类、瓣鳃类、掘足类、腹足类、双神经类的特征。玻纤结构是节肢动物钙壳的特征,在某些软体动物外层或内层,个别八射珊瑚骨针中也有。在有孔虫最高级的轮孔虫亚目中出现。单晶结构是棘皮动物的主要特征。

从上述可见,生物硬体钙质结构存在着点、线、面的演化方向,其中单晶、玻纤和珍珠又代表粒状、纤(柱)状、片状中最高级的结构。一种钙质生物的主壳层结构,在较高级的钙质生物中以外壳层保留,甚至消失,但在较低级的动物中,却要演化到高级阶段才能出现。

## (二) 各门类生物化石钙质结构演化

同一门类化石,结构也不尽相同,存在着演化,就是趋异。藻类中,从32亿年前就出现的最古老的兰藻富粘结胶粒结构;从十亿年前开始的红藻多呈隐粒结构;而晚志留世出现的轮藻藏卵器壳为柱纤结构。

有孔虫中,从前寒武纪就出现假几丁质壳(Lagynacea);从寒武纪初开始出现胶粒壳(星根虫科Astrorhizidae);从奥陶纪开始出现钙质微粒壳(仿砂户虫超科Parathuramminacea);从晚志留世开始出现层纤内层(似节房虫Nodosinellidae);从石炭纪开始出现瓷质壳(菲休虫科Fischerinidae);从二迭纪开始出现玻纤壳(节房虫科Nodosariidae);到中生代,玻纤壳越来越发育,除瓷质壳外,其他类型逐渐衰落。

珊瑚纲也存在着结构演化,从中寒武世开始的床板珊瑚为层纤结构,从中奥陶世开始的四射珊瑚也以层纤为主,但在志留纪出现过呈柱纤的隔壁刺,在泥盆纪出现过柱纤隔壁;从中三迭世开始的六射珊瑚,初期也有层纤隔壁;但主要发展柱纤,有的甚至出现球纤。

苔藓虫中,寒武纪开始出现的窄唇纲(Stenolaemata)的泡孔目(Cystoporate)