

# 大洋多金属结核成因新说\*

陈建林 韩喜球 沈华悌

(国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

**提要** 1994—1995 年对东太平洋锰结核包壳及其内部纹层构造作光学显微镜和透射电子显微镜的系统研究。结果表明,深海锰结核是一种锰质核形石,其包壳是叠层石。光滑状和瘤状锰质核形石分别是由微小叠层石和奇异叠层石构成,而叠层石则由纳米级微生物建造而成。新近发现的中华微放线菌和太平洋螺球孢菌分别是微小叠层石和奇异叠层石的建造者。这种典型微生物岩的发现对大洋锰结核成因的认识提供了依据。

**关键词** 东太平洋 锰结核 叠层石构造 纳米级微生物

**学科分类号** P736

自 19 世纪中叶英国“挑战者”号在大西洋底首次发现锰结核以来,人们在海底“黑色资源”实施调查的同时,也注重于成因的研究。一般认为锰结核中的纹层构造是由沉积动力学机理形成,其内部物质主要是胶体化学成因(许东禹,1993; Sorem *et al*, 1977)。随着研究的深入,有学者认为微生物在锰结核形成过程中起着重要的作用,是结核生长的促媒剂(阎葆瑞,1994)。1973 年比利时古生物学家 Monty 就提出锰结核是叠层石这一看法,但由于缺乏足够的证据而未被世人所接受。

本文试图通过对锰结核内部纹层构造特征与纳米级微生物生长之间关系等研究,以获得深海锰结核成因的直接证据,论述锰结核形成机制及其意义。

## 1 材料与方 法

锰结核样品取自东太平洋的中国多金属结核(锰结核)开辟区内<sup>1)</sup>。结核表面特征有粗糙型(瘤状)和光滑型之分,它们分别主要分布在相距数百海里的东、西两区内,覆盖范围达  $15 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。在普遍鉴定的基础上,挑选出在水深、地形、沉积物等方面具有代表性的 10 个结核样品作重点鉴定与研究。利用光学反光显微镜观察结核磨光面上纹层构造特点,以区分结核叠层石构造类型。并着重在放大数万倍乃至 20 万倍的透射电镜下鉴定构成纹层的成分、纳米级微生物形态与生长方式及其群体特征。配以 X 射线衍射和电子探针等手段作矿物(主要是锰矿物)和元素成分分析。

\* 中国大洋协会与国家海洋局“八五”研究专题, DY85-02-02-02 号。陈建林, 男, 出生于 1941 年 10 月, 高级工程师, Fax: 0086-0532-8071539

1) 1991 年中国被联合国批准为大洋矿产先驱投资者, 在太平洋国际海底获得  $15 \times 10^4 \text{ km}^2$  合法的开辟区

收稿日期: 1996-07-10, 收修改稿日期: 1998-10-20

## 2 研究结果

### 2.1 锰结核壳层

深海锰结核的形成总以固体物为核心向外全方位生长而构成包壳,任何一个结核都包含有核心和包壳两部分。而包壳由若干个壳层组成,壳层内部又有多种显微构造纹层。相邻壳层接触界面往往存在着破损面或显微破碎带,呈平行不整合或角度不整合(图 1: 1, 2)或夹有一些粘土物质及古生物化石碎片。结核的壳层实际上也可看作是构造层,它受全球性的古海洋事件的影响。由于海洋环境的明显变化,导致了新老壳层内显微构造类型和化学成分的差异。壳层界面的出现,说明结核的生长曾发生间断或遭受过侵蚀,故结核壳层及其显微纹层是结核形成过程的历史记录,它记载着结核在漫长的地质年代中的动荡和相对稳定的生长轨迹,也是反映古气候变迁与地球化学环境变化的标志。

### 2.2 叠层石构造与纳米级微生物

**2.2.1 叠层石构造类型** 经鉴定,深海锰结核具有锰质核形石特征(边立曾,1996)。构成核形石的有两种叠层石,即微小叠层石和奇异叠层石。

**微小叠层石(Minimia)** 柱体呈圆柱形(图 1: 3)。宽 0.1—0.25mm,高 2mm 以上。不具壁,有檐,连接桥发育。这些特征与微小叠层石群的群征相符。由内向外柱体生长形式:不分叉→平行分叉→芽状分叉→不分叉。微小叠层石构成的锰结核表面光滑,壳层厚度薄,微层细密,多呈线状,丝状,形状比较规则。

**奇异叠层石(Abmirabilis)** 呈瘤柱状。柱体表面凹凸不平,高达 1.5mm。分叉形式呈掌状(图 1: 4),具不规则的粗短芽体,母柱体宽 0.5mm 左右,子柱体宽 1.5mm 左右,基本层呈拱形。这些特征与奇异叠层石群的群征相符。由奇异叠层石体构成的锰结核,表面呈瘤状,质地疏松多孔。壳层厚,微层少而粗。以波形带状、层状为特征。

上述两种叠层石构造分别出现在中国多金属结核开辟区内的光滑状(s型)和粗糙状(r型)结核中,即两种不同表面特征的锰结核由不同种的叠层石构成。

**2.2.2 纳米级微生物种类及其特征** 经透射电子显微镜分析,微小叠层石和奇异叠层石分别是由中华微放线菌和太平洋螺球孢菌化石组成的。

**中华微放线菌(Miniactinomyces chinensis)** 中华微放线菌呈串珠状丝体(图 1: 5)。丝体直径约为 2—4nm,丝体分叉,交织成网。多数丝体上发育串珠状孢子,呈长链状。孢子直径为 3nm 左右。串珠状繁殖菌丝缠绕成的孢囊,直径一般为 70nm。菌席平滑,平坦膜状,相互叠置。在菌席上可分出菌落,其中心下陷,围绕中心存在着辐射状轻微褶皱,相邻菌落相互连接。同时菌落表面存在着因丝体紧密而形成的致密皮壳(林承毅,1996)。

**太平洋螺球孢菌(Spirisosphaerospora pacifica)** 太平洋螺球孢菌个体极其细小,为纳米级。菌落呈圆盘状至不规则分枝状。菌丝围绕中心或分枝轴线呈辐射状排列。按形状可将菌丝分为营养菌丝体和生殖菌丝体。营养菌丝体呈枝状,聚集成基垫,其内发育辐射状丝体束。生殖菌丝体由基垫伸出,为粗细不等的螺旋状分枝(图 1: 6)。在生殖菌丝体相互交叉的绒毛内发育不具孢囊壁的球形孢囊,孢囊内分散保存有球形孢子。生殖菌丝形成的螺旋长为 36—200nm,宽为 3—25nm,螺环宽 2—4nm(张富生,1995)。

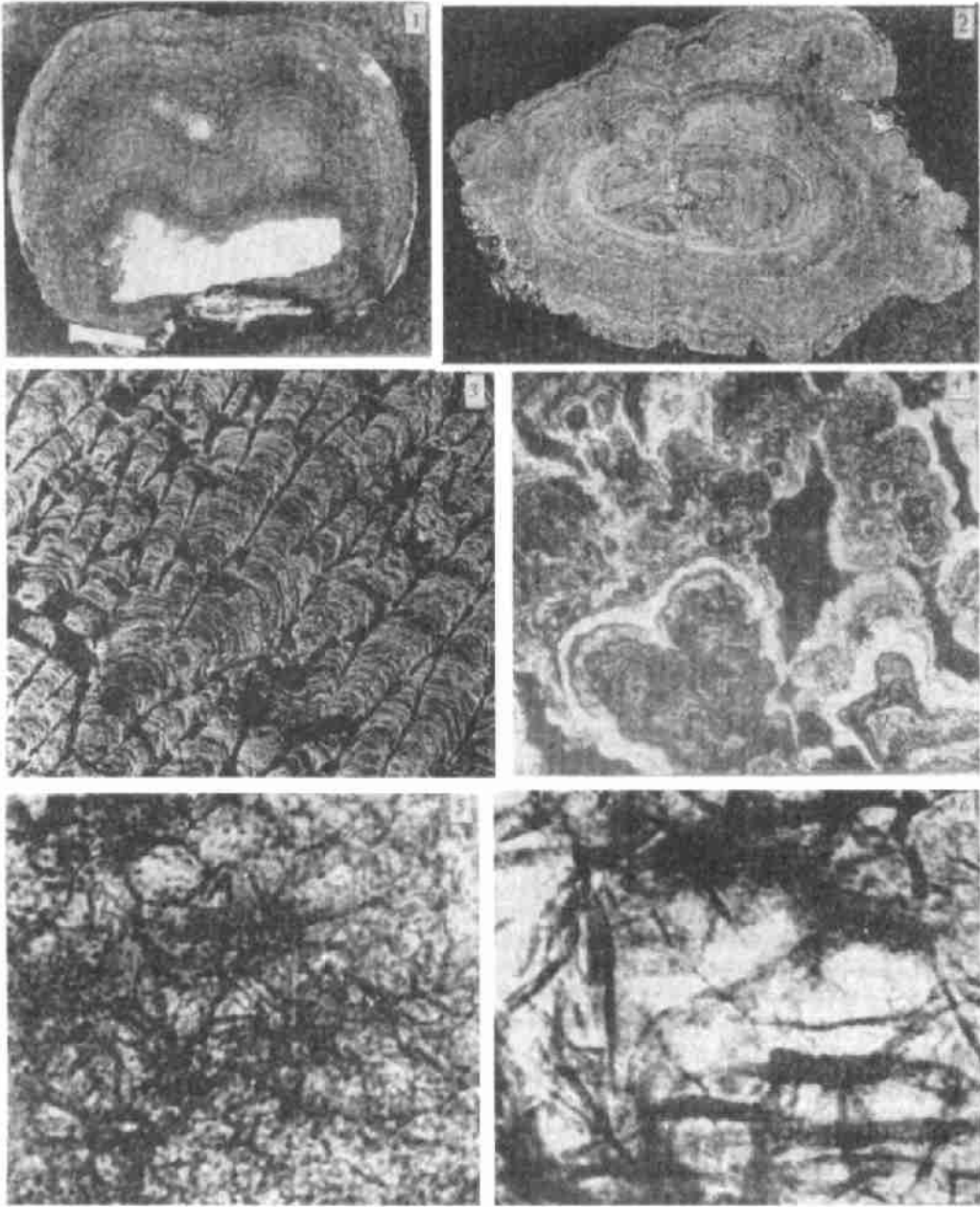


图1 光滑型与粗糙型锰结核磨光面特征及透射电子显微镜下超微化石特征

Fig.1 The features of the polished section of smooth type and rough type manganese nodules and the ultra-microfossils under transmission electron microscope

1. 2401号标本光滑状锰结核磨光面,  $\times 1$ ; 2. 127号标本瘤状锰结核磨光面,  $\times 1$ ; 3. 微小叠层石柱体与纹层, 反光显微镜,  $\times 100$ ; 4. 奇异叠层石柱体与纹层, 反光显微镜,  $\times 100$ ; 5. 中华微放线菌, 透射电子显微镜照片,  $\times 200\ 000$ ; 6. 太平洋螺球细菌, 透射电子显微镜照片,  $\times 200\ 000$

### 2.3 叠层石形态与微生物生长关系

叠层石形态与纳米级微生物细节特征之间存在着密切关系。即锰结核的外形及其内

部纹层形态,取决于超微生物菌席形态,是中华微放线菌平滑的菌席使光滑型结核具有细密而又规则的纹层,并在结核磨光面上往往表现为圆柱状特征。同样,太平洋螺球孢菌的不规则膜状的菌席导致粗糙型瘤状锰结核具有不规则纹层,磨光面上多呈掌状、花瓣状。

#### 2.4 深海锰结核的成因

东太平洋海盆锰结核调查区海底为弱碱性氧化环境。大部分地方水深在 5 000m 左右,底质沉积物以硅质粘土为主,底层水与海底表层沉积物中存在着大量的微生物群和丰富的成矿金属元素(阎葆瑞,1994;布洛克,1981)。从海上调查现场对新鲜锰结核样品的活体微生物培养菌实验可知,锰结核中存在有多种好氧细菌和厌氧细菌,如:锰氧化菌、不动细菌、产碱细菌、芽生细菌、假单孢细菌与硫酸盐还原细菌等(史君贤,1996,1998),表明大洋底活跃着相当丰富的不同生理类群的微生物。但从微生物化石的透射电镜分析发现,广泛分布于锰结核中纳米级大小的中华微放线菌和太平洋螺球孢菌化石内均充填着铁锰物质。前者富 Fe,后者富 Mn。这符合光滑状和瘤状结核中铁锰含量存在明显差异之特点。联系它们的菌席、菌落特征与纹层发育关系,认为中华微放线菌和太平洋螺球孢菌是深海锰质核形石(锰结核)的建造者。由于不同地貌部位的底层水及沉积物间隙水中的元素种类及其丰度不一的原因,微生物汲取到体内维持其生理发育需要的营养物质(Fe、Mn 等金属元素及其含量)必然有所差异。中华微放线菌和太平洋螺球孢菌这些微生物栖息在海底任何固体物质周围,按各自的生活习性与生长方式生长,最早形成单一纹层,而后逐渐完善成一柱体。随着时间的延续,微生物群体在历经千百万年的世代繁衍后,完成了一个又一个生长旋回。微生物的周期性生长使包壳不断向外扩展加厚,从而成为今天人们所发现的锰结核(锰质核形石),并且至今仍在继续生长。

必须指出的是,在微生物生长的过程中,它们并非都以同样的速率生长。当有利于微生物生长的环境受到干扰或变化时,有可能放慢了生长速度,造成铁、锰及其它元素的减少,而相对增加了粘土物质及微古碎屑等杂质的沉淀数量。因此局部环境的变化,也许是明暗相间纹层形成的原因。而当受到全球性古海洋事件的影响,南极底层流作用明显变弱、低温富氧的环境被改变时,则出现生长间断期。此时海底微生物生长基本停滞,机械沉积物显著增多,原先形成的纹层也会受到不同程度的破坏。

微生物凝聚和富集多种金属元素,它们不仅可以在各种不同固体附着物上建造锰质核形石(锰结核),而且还在其新陈代谢的过程中直接富集金属元素堆积成矿。另一方面由于海底的锰氧化菌和锰还原菌的活动,可改变或影响介质中的 pH、Eh 值的升高或降低,促进氧化-还原作用的进行,造成 Fe、Mn 化合物的溶解,元素的迁移或氧化低价态 Fe、Mn 成高价态化合物沉淀,使得结核中不仅赋存有丰富的 Fe、Mn 元素,也导致铁锰矿物的形成。据作者鉴定,主要锰矿物有钙锰矿、水钠锰矿和水羟锰矿等,瘤状和光滑状结核分别以含钙锰矿和水羟锰矿为主,它们一般为生物成因锰矿物。故此结晶差、颗粒微细。

在漫长的地质年代中,底层水和沉积物间隙水中的多种金属阳离子与叠层石体内及锰矿物中的 Mn、Fe 元素也在不断地进行交换(钱江初,1996),使得结核中积聚了除 Fe、Mn 之外的其它金属阳离子,如 Cu、Ni、Pb、Zn 等,并在特定的条件下,可使生物锰矿物经重结晶作用成为相对结晶较好的锰矿物(如钙锰矿)电子探针分析结果表明,亮带 Mn、Cu、

Ni、Zn、Na、K 含量高,而暗带 Fe、Co、Ti、Si 含量高。这不仅反映了结核生长和间断交替进行,还说明亮带中的晶质锰矿物主要为钙锰矿(钡镁锰矿)(陈建林,1996)。

### 3 结语

一百多年来的传统观念认为深海锰结核是胶体化学成因的。通过作者对中国太平洋多金属结核开辟区中光滑型与粗糙型(瘤状)结核样品的系统研究后,认为深海锰结核是一种典型的生物岩(锰质核形石)。光滑状和瘤状核形石分别是由微小叠层石和奇异叠层石构成,而中华微放线菌和太平洋螺球孢菌又分别为此两种叠层石的建造者。是它们在生命活动过程中,汲取了 Fe、Mn 等元素作为自身生理发育之营养,按各自的生活习性与生长方式,经过千百万年的世代繁衍和周期性生长而成的。壳层的出现是古海洋环境变化的影响而造成的叠层石生长间断期之标志。金属阳离子(Cu、Co、Ni、Zn 等)的交换作用与重结晶作用,导致了结核内部多种金属元素的富集和钙锰矿等结晶程度的转变。作者认为把锰结核看成是一种典型的微生物岩,这不仅合理解释了其内部复杂现象,而且是对锰结核成因理论的一个重大突破。

**致谢** 透射电镜下的超微生物化石鉴定由南京大学现代分析中心张富生、林承毅完成;徐克勤、王德滋、曹瑞骥、梁玉左、朱士兴、邱树玉等教授在本研究过程中给予指导与帮助,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

- 边立曾,1996. 深海锰结核——核形石的新类型. 地质学报,70(3):232—236
- 史君贤,1996. 锰细菌对锰铁金属离子的转换作用. 海洋学报,18(4):85—89
- 史君贤,1998. 东太平洋铁锰结核区微生物的丰度及其成矿作用研究. 海洋与湖沼,29(5):458—465
- 布洛克 T D,1981. 微生物生物学. 四川大学译,1981. 北京:人民教育出版社,196—219,407—413
- 许东禹,1993. 多金属结核的特征及成因. 北京:地质出版社,93—107
- 陈建林,1996. 东太平洋多金属结核中的钡镁锰矿. 沉积学报,14(增刊):171—180
- 张富生,1995. 深海锰结核中螺旋状超微生物化石的发现及其意义. 高校地质学报,1(1):109—116
- 林承毅,1996. 深海锰结核中微生物的分类及串珠状超微生物化石的研究. 科学通报,41(9):821—824
- 钱江初,Mellin T A,1996. 1nm 锰矿相的金属阳离子交换能力的研究. 海洋学报,18(4):56—62
- 阎葆瑞,1994. 太平洋中部水-岩系统中微生物活动及其成矿作用. 北京:地质出版社,39—56
- Monty C L V,1973. Les nodules de manganese sont des stromatolites oceaniques. C K Acad Sci, 276:3 285—3 288
- Sorem R K, Fewkes R H, 1977. Intenal Characteristics. In: Glasby G P, ed. Marine Manganese Deposits. Amsterdam: Elsevier, 147—183

## ON THE ORIGIN OF POLYMETALLIC NODULES IN DEEP SEAS

CHEN Jian-lin, HAN Xi-qiu, SHEN Hua-di

(Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou, 310012)

**Abstract** To study the origin and formation mechanism of manganese nodules from the Pacific Ocean, we identified systematically the coatings and their internal laminated structures of them during 1994 to 1995. An optical microscope was used to identify the types of stromatolites, and a transmission electron microscope (TEM) was used to observe the morphological feature, growth pattern and colony features of microbe fossils which make up stromatolite. Magnates and chemical composition in manganese nodules were analysed by X-ray diffraction and electron probe. The results indicate that manganese nodules in deep-sea are microbiogenic in character. Smooth and rough types of manganese nodules are composed of *Minima* and *Admirabilis* respectively, and the ultra-microfossils — *Miniactinomyces chinensis* and *Spirisospherospora pacifica* made up *Minima* and *Admirabilis* respectively. Hence, the crystallization of manganates is poor and the internal structures are complicated; it does not support the hypothesis that manganese nodules are of a chemical origin.

**Key words** Eastern Pacific Ocean      Manganese nodules      Stromatolitic structure  
Ultra-microfossils

**Subject classification number** P736