科 学 通 报
第42卷 第4期 Chinese Science Bulletin 1997年2月

【特邀论文】

超微生物是大洋多金属结核成矿的建造者

陈建林① 张富生② 边立曾③
(①国家海洋局第二海洋研究所,杭州 310012;②南京大学现代分析中心;③南京大学地球科学系,南京 210093)

摘要 通过对太平洋中国开辟区内多金属结核(锰结核)内部纹层构造及锰矿物特征的透射电子显微镜系统研究,以充分的证据,提出了锰结核是超微生物建造体的新观点,认为它是一种典型的锰质核形石. 光滑状和瘤状锰结核的分布与矿区地质背景密切相关,分别是由新近发现的纳米级中华微放线菌和太平洋螺球孢菌历经千百万年的世代繁衍和不断堆积加厚而成的.

关键词 大洋锰结核 叠层石 超微生物 生物岩

大洋多金属结核(锰结核)以其富含多种有用金属元素而为世人所日益重视. 1873年英国的"挑战者号"在大西洋首次发现的锰结核,已成为当今世界上一些大国开发海洋的重要"黑色资源". 十多年来,我国也成功地进行了数次太平洋多金属结核资源调查,基本上探明了在中国开辟区内锰结核的丰度、品位、储量及其分布特点. 然而对其成因,虽经国内外地学工作者几代人的探索,却仍未取得比较一致的看法. 一百多年来的传统观念,一般认为锰结核中的纹层构造是沉积动力学形成的机理,其内部物质主要是胶体化学成因的[1, 2],锰结核的形成是由氧化作用和胶体化学作用使Mn和Fe等元素从底层水和沉积物间隙水中积聚的结果. 随后一些学者认为微生物在锰结核形成过程中起着重要的作用[3]. 1973年比利时古生物学家Monty提出锰结核是叠层石这一看法[4],但由于缺乏足够的证据而未被世人所接受.

然而,在我们最近通过对锰结核样品的透射电子显微镜的系统观察与鉴定,发现深海锰结核是由超微生物生长发育起来的. 本文主要从叠层石纹层特征、建造锰结核的两种超微生物的发现,以及生物成矿机制等问题的阐述,论证深海锰结核生物成因的观点.

1 锰结核叠层石构造的证据及类型

锰结核内部具有极其发育的多种形态类型的纹层,它们的形成始终是一个"谜". 传统看法把其内部各种纹层形状描述为斑杂状、柱状及蛔状等构造. 但笔者通过透射电镜、扫描电镜等系统鉴定与研究的结果,认为锰结核内部纹层构造是叠层石构造,这种构造的产生主要是由海底生物活动形成的. 而且两种不同表面特征的锰结核是由两种不同叠层石构成,其他构造类型均是由此基本类型在不同切面上的反映. 因此,确切地说,锰结核内部构造乃是指微生物群体垒造的叠层石形态以及它们在空间上的分布关系.

1.1 锰结核叠层石构造的证据

磨光面上呈明暗相间纹层构造是深海锰结核重要的特征,它与古老地层碳酸盐岩的叠层石构造极其类似[5]. 碳酸盐岩中的叠层石构造基本上分两种类型:一是富藻纹层石,富含有机质,薄片中呈暗层(透射光);二是碳酸盐纹层,有机质少,呈亮层. 明暗层交互出现,即成为叠层石构造. 虽然在深海锰结核光片中(反射光)显示出的亮暗层的物质成分与碳酸盐岩的亮

暗层有本质上的差别(前者以铁锰氧化物、粘土物质为主),但它们的纹层图形却很类似. 经鉴定认为,深海锰结核具有锰质核形石特征,其包壳一般都呈同心环带状,也可以认为,叠层石与核形石本身就是一种菌藻成因的生物沉积构造. 锰结核中的叠层石是目前已知的叠层石中最小的一类,即微叠层石[6].

1.2 锰结核的叠层石构造类型

1.2.1 微小叠层石(*Minima*) 柱体呈圆柱形,宽 0.1～0.25 mm,高 2 mm 以上. 柱体内纹层多达十几层(图 1(c)). 横切面上呈鳊状构造. 此种叠层石有檐,不具壁,连接桥发育.

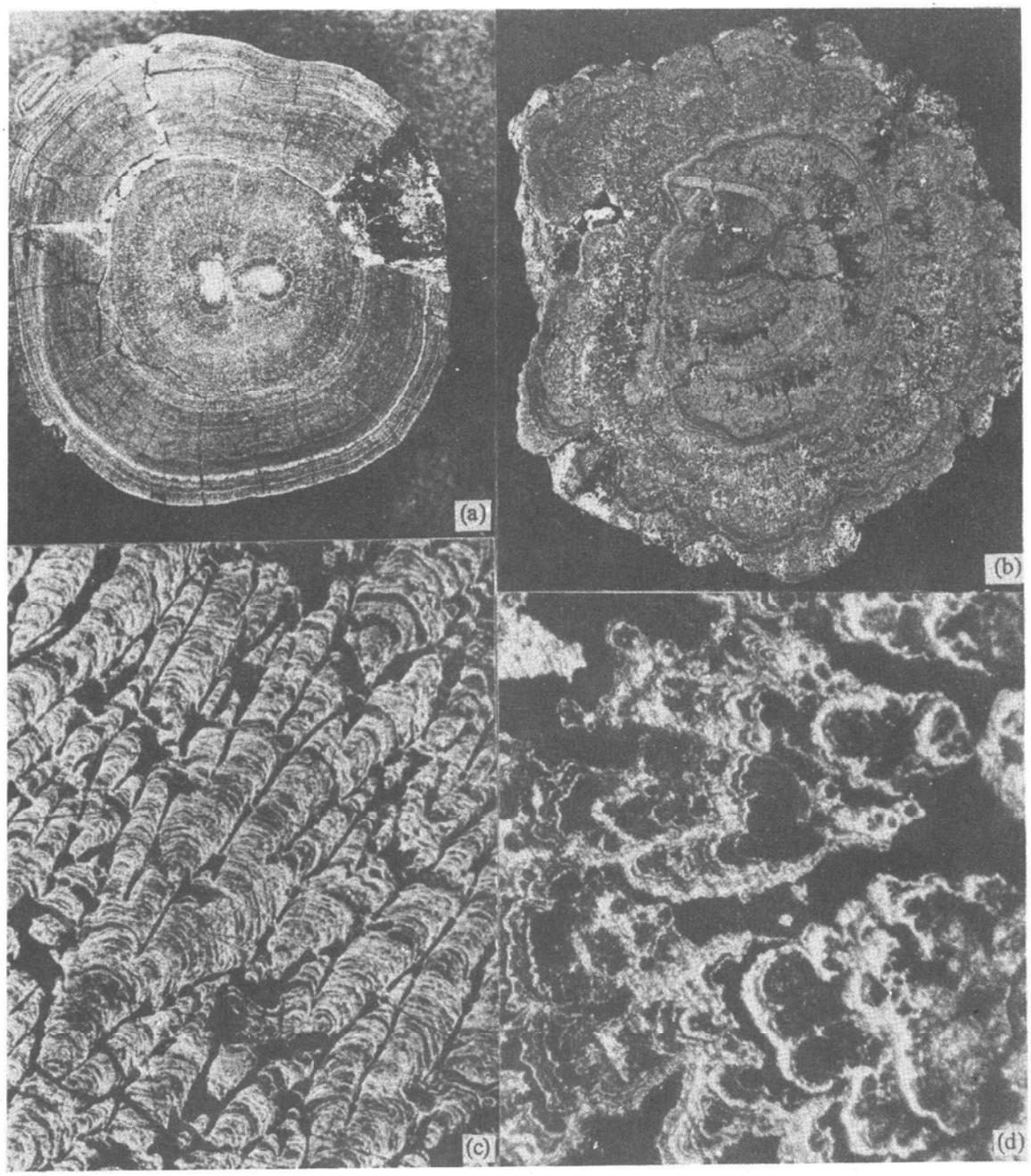

图 1 光滑状锰结核光面,×1(a)、瘤状锰结核磨光面,×1(b)、微小叠层石,光学显微镜,×100 (c)和奇异叠层石,光学显微镜,×100(d)

由内向外柱体生长形式是:由初始的不分叉,经平行分叉→芽状分叉,最后又恢复到不分叉(图1(c)). 观察结果表明,由微小叠层石构成的锰结核,壳层厚度薄,微层细密,多呈线状、丝状,形状比较规则,因此结核表面比较光滑. 我国太平洋开辟区西部光滑状结核内部普遍出现微小叠层石构造类型.

1.2.2 奇异叠层石(*Admirabilis*) 柱体呈瘤柱状. 高达 1.5 mm 左右,表面凹凸不平. 呈花瓣状、掌状分叉(图 1(d)),具不规则的粗短芽体. 基本层呈拱形. 由奇异叠层石体构成的锰结核,质松多孔,壳层厚,纹层少而粗,中间厚两侧薄,呈块茎状(图 1(d)). 此种锰结核表面多呈瘤状. 开辟区东部粗糙型瘤状结核内部普遍出现奇异叠层石构造类型.

2 建造大洋多金属结核的超微生物

在放大一二十万倍的透射电子显微镜下,发现叠层石纹层是由众多的纳米级超微生物化石按一定的生长方式堆积起来的. 经鉴定,串珠状超微生物是中华微放线菌(新种),螺旋状超微生物为太平洋螺球孢菌(新种),它们分别发现于光滑状结核和瘤状结核中,也就是说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构成的.

2.1 中华微放线菌(*Miniactinomyces chinesis*)

透射电镜显示中华微放线菌呈串珠状丝体(图 2(a)). 其直径约 2～4 nm,丝体分叉,并交织成网. 串珠状孢子呈长链状,孢子直径 3 nm 左右. 菌席平滑,平坦膜状,相互叠置. 菌落中心下陷,呈草帽状. 相邻菌落相互连接,表面成致密状皮壳[7].

2.2 太平洋螺球孢菌(*Spirisosphaerospora pacifica*)

太平洋螺球孢菌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. 按其形状可分为营养菌丝和生殖菌丝体. 前者呈枝状,后者为粗细不等的螺旋状分枝,并发育有球形孢囊(图 2(b)). 生殖菌丝螺旋长为 36～200 nm,宽 3～25 nm,螺环宽2～4 nm[8].

透射电镜揭示了这样一个本质问题,即锰结核的外形及其内部纹层形态取决于上述两种超微生物的菌席和菌落的发育特征. 表面光滑的锰结核及其内部细密而又规则的纹层,并在磨光面上往往表现为圆柱状特征,是中华微放线菌平滑的菌席和草帽状菌落所致. 同样,表面为瘤状的锰结核及其内部不规则纹层,磨光面上多呈掌状、花瓣状特征,是由太平洋螺球孢菌的盘状菌落与不规则膜状的菌席造成波状起伏的拱形纹层而引起的. 因此深海锰结核实质上就是一种典型的生物岩.

3 生物锰矿物分布与特征

深海锰结核是多组分的集合体,而锰矿物是其中的重要组成. 因此,锰矿物的生物成因证据也就成为论证锰结核成因的重要依据之一.

我们认为,锰结核中的锰矿物是生物成因矿物. 透射电镜下观察到钙锰矿、水羟锰矿及水钠锰矿等是分布在锰结核的生物结构范围内,即叠层石的柱体和纹层内. 而硅藻、放射虫及其他机械沉积物则分散在叠层石柱体之间及壳层中[7]. 这些矿物多呈束状、纤维状和树枝状(图 3(a), (b)),并与上面提及的超微生物的菌丝体形态一致,以及从生物结构到矿物晶体之间的过渡状态. 研究认为,钙锰矿等几种锰矿物的雏晶就是在海底超微生物的生命活动过程中集聚 Fe 和 Mn 等元素而直接形成的生物矿物. 因此,锰矿物结晶程度极差,光性特征不明显,成分变化大,含水量高. 表现在电子衍射花样上衍射点和衍射环多数模糊不清.

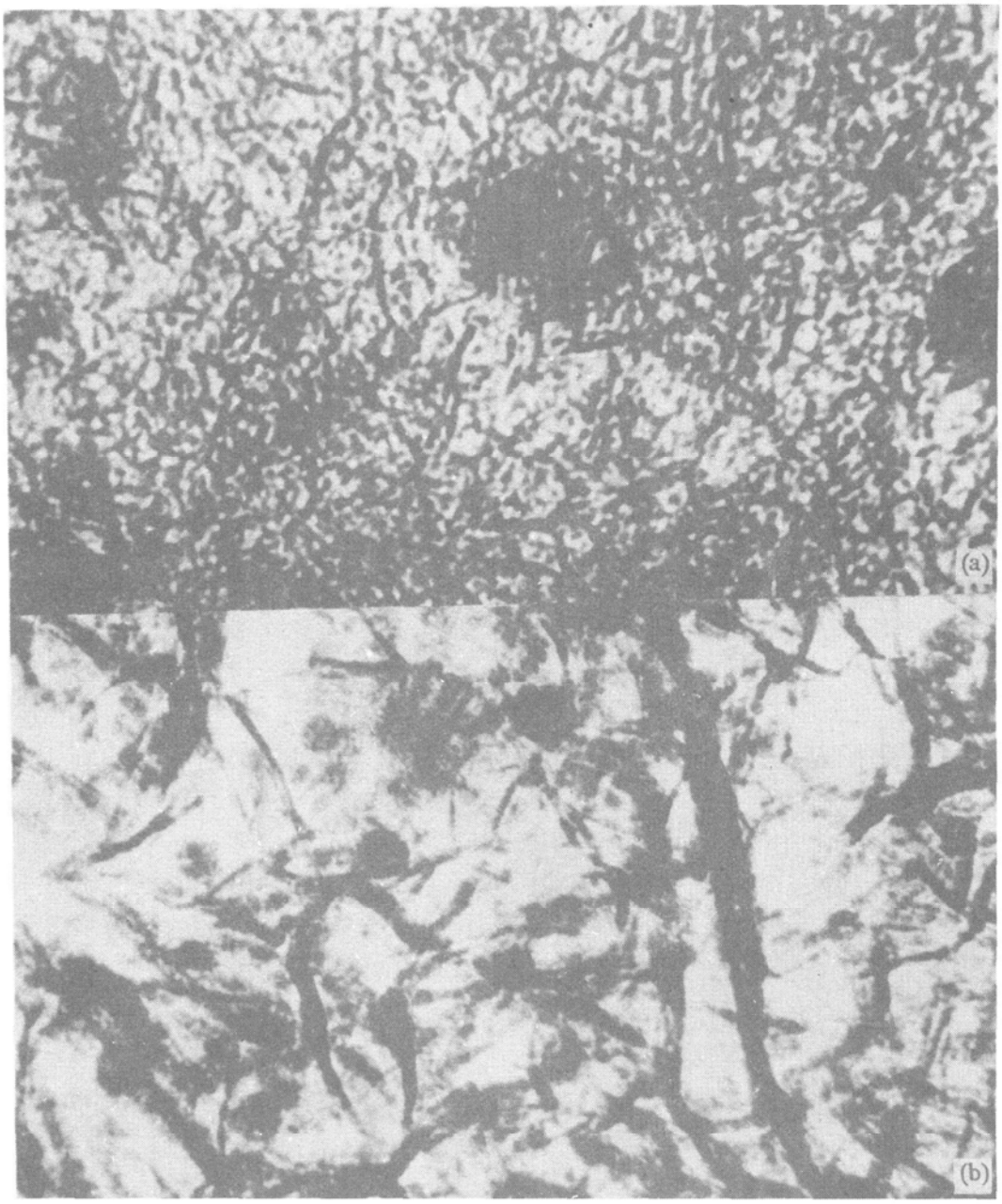

图 2 透射电子显微镜中华微放线菌串珠状生殖菌丝及孢囊, ×30 000(a)和太平洋螺球孢菌生殖菌丝(螺旋状)及无孢壁孢囊, ×20 000(b)

4 多金属结核成矿机制简述

4.1 结核分布区地质背景

多金属结核调查表明,锰结核在海底的分布与矿区地质背景密切相关. 构造运动、火山喷发、地形、水深、沉积物类型、底层流以及地球化学环境等因素的综合影响,对微生物的生存与生命活动过程息息相关.

调查区东西两区相距数百公里. 东部构造运动强烈,地形近南北走向,并有一条贯穿全区

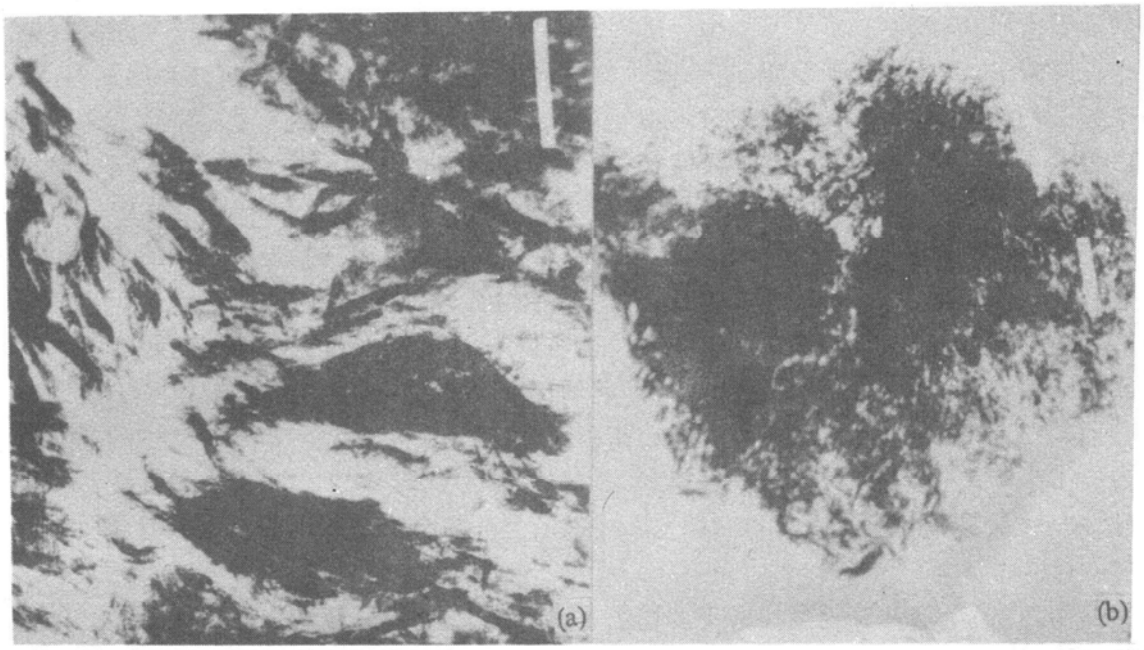

图 3　透射电子显微镜水羟锰矿集合体，呈束状，白线 = 100 nm (a)和微粒状方锰矿与水羟锰矿伴生，白线 = 1 000 nm (b)

的中央断裂带，形成了东西向分布的结核富集带．西部火山活动活跃，海山发育．近东西向的海山链和近南北向的丘间盆地交叉控制本区地形，锰结核在丘间洼地富集．结核类型上，东区以个体大、瘤状结核占主导；西区以个体小、光滑状结核为普遍．在同一区域内，海山和丘顶结核小而光滑，低缓区结核大而粗糙．事实上，处于不同地貌部位上的结核，主要受水深的控制．水深的差距，导致了沉积物类型及地化环境要素的差异．而地球化学环境的不同，又使微生物、超微生物种属及其丰度产生变化．调查区结核分布集中地方，水深一般在 4 900～5 200 m 的硅质沉积物中(略深于 CCD 界面)．而小于或大于此水深，结核丰度明显变低，有的无结核分布[1)]．后者表明环境不利于建造锰结核的微生物生长，甚至威胁着它们的生存．

锰结核分布区为弱碱性氧化环境．低温、富氧、高密的南极底层流经西区向东流动，造成西区比东区氧化程度高($Eh_{(西区)}$ = 451 mV，$Eh_{(东区)}$ = 432 mV)，同一区域内海山区又比丘间盆地氧化程度强[9]．光滑结核一般出现在 Eh 值高的地方，瘤状结核多分布在 Eh 值相对低的地方．这与微生物特别是中华微放线菌和太平洋螺球孢菌的生态直接相关．大洋底存在着大量的微生物群和丰富的成矿金属元素，这已为许多资料所佐证[10]．而在调查区现场通过对底层水、沉积物与锰结核中活体微生物培养菌实验，进一步证实了在有氧或无氧环境中微生物(好氧菌和厌氧菌)生存在 500 个大气压洋底的可能性[11]．

4.2　锰结核成矿简述

超微生物体内所集聚的金属元素，是它们在自己生命活动过程中，根据自身的嗜好从介质中有选择性地吸取了 Mn 和 Fe 等元素，以作为其生理发育所需营养之结果．中华微放线菌和太平洋螺球孢菌按各自的生活习性和生长方式生长，首先形成菌丝、孢囊，而后菌席、菌落及

1) 国家海洋局．太平洋多金属结核资源勘探报告(DY85-4 航次)，1995

其他. 最早形成单一纹层,而后逐渐完善成柱体. 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,即经过分叉与复合若干阶段(一个壳层可能是一个生长旋回,也可能是若干个旋回).. 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). 底层水和表层沉积物交界处是生物作用及物理化学作用最为活跃的系统,微生物生长发育良好,故产状为半埋藏的锰结核,其中部一般呈葡萄状突起.

不难理解,在微生物生长过程中,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,必然放慢了生长速度. 更确切地说,微生物吸取 Fe 和 Mn 及其他元素的能力受到遏制,而相对增加了粘土物质及微古碎屑等杂质的沉淀数量. 也影响了此时形成的纹层或壳层内物质结构的紧密程度. 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,原先形成的最外层界面也受到不同程度的破坏. 这就是我们所认为的与后期重新生长的呈假整合或角度不整合关系的壳层接触界面之所在(图 1(a)、(b)).

必须指出,微生物具有凝聚和富集多种金属元素能力,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),还在其新陈代谢的过程中,产生大量有机质,与金属离子形成络合物,直接富集金属元素堆积成矿. 另一方面由于海底微生物(锰氧化菌和锰还原菌)的生化作用,改变或影响了介质中的 pH 和 Eh 值的升高或降低,促进氧化-还原作用的进行,造成 Fe 和 Mn 化合物的溶解,元素的迁移或氧化低价态 Fe 和 Mn 成高价态化合物沉淀. 使得结核中不仅赋存有丰富的 Fe 和 Mn 元素,也导致铁锰矿物的形成.

人工 1 nm 锰矿相阳离子交换能力的成功实验[12],从另一侧面反映了这样一个事实: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初始形成的锰矿物中的 Mn 和 Fe 元素,也同时在不断地进行交换. 使得结核中积聚了除 Mn 和 Fe 之外的其他金属阳离子,如 Cu, Co, Ni 和 Zn 等,并在特定的条件下,一些生物锰矿物,经重结晶作用变为相对结晶较好的锰矿物,使鉴定者在结核的微区分析中,有可能观察到若干柱状、板状的矿物晶体(如钙锰矿等).

综上所述,我们有理由认为,微生物特别是中华微放线菌和太平洋螺球孢菌的生命活动过程奠定了深海锰结核为生物岩的基本"格局". 没有海底微生物的世代繁衍及生化作用,那么在结核中就不可能有这样丰富的生物锰矿物,也很难设想有如此巨大规模的多金属结核广泛分布在大洋底沉积物表面. 我们提出的深海锰结核是生物岩——锰质核形石的这一研究成果,揭示了锰结核成因的"秘密",对一百年来的传统观念是一个重大突破,这本身就具有深远的意义,也使存在于锰结核内部矿物结晶差、颗粒细、成分变化大等复杂现象得到合理解释. 对今后锰结核形成机制的更深入研究开辟了新的途径,也对进一步阐明多金属结核的分布规律提出了成因上的理论依据.

致谢 徐克勤、王德滋、曹瑞骥、梁玉左、朱士兴、邱树玉等教授对叠层石与超微生物鉴定工作给予指导与帮助,作者表示感谢. 本工作为"八五"国家专项基金资助项目,以及中国大洋协会和国家海洋局"八五"大洋多金属结核研究开发专题.

科 学 通 报
第 42 卷 第 4 期 Chinese Science Bulletin 1997 年 2 月

【研究简报】

二元非线性等重码的检错性能

符方伟 夏树涛
(南开大学数学系,天津 300071)

关键词 非线性等重码 最佳检错码 最优等重码.

等重码在编码理论中占有重要的地位,它在通信系统中有着广泛的应用. 文献[1~5]研究了二元非线性等重码的检错性能,并证明了:当 $n>8$ 时,二元$(n, 2, w)$非线性等重码均不是最佳检错码. 王新梅[2]提出了一个猜想:当 $n>4\delta$ 且 $\delta>1$ 时,二元$(n, 2\delta, w)$非线性等重码均不是最佳检错码. 本文研究了二元$(n, 2\delta, w)$非线性等重码的检错性能,推导出非线性等重码成为最佳检错码的必要条件,从而说明,当 n 适当大时,二元$(n, 2\delta, w)$非线性等重码均不是最佳检错码. 本文详细分析了 $\delta=2, 3$ 的情形,说明此时存在码长超过 4δ 的二元非线性最佳检错等重码. 我们认为王新梅的猜想应该改正为:$n>8\delta$ 时,不存在二元$(n, 2\delta, w)$非线性最佳检错等重码.

1 二元$(n, M, 2\delta, w)$等重码成为最佳检错码的必要条件

由文献[1]知,在二元对称信道(BSC)中,设误码率为 p,用 $d_H(\cdot,\cdot)$表示码字之间的 Hamming 距离,则在所有的码字等概发送的情况下,码长为 n,码字数目为 M 的二元码 C 的平均不可检错误概率为

$$P_e(p)=\frac{1}{M}\sum_{a\in C}\sum_{\substack{b\in C\\ b\neq a}}(1-p)^{n-d_H(a,b)}p^{d_H(a,b)}=$$

参 考 文 献

1 Sorem R K, Fewkes R H. Intenal characteristics. In: Glasby G P, ed. Marine Manganese Deposits. Amsterdam: Elsevier, 1977, 147~183
2 许东禹. 多金属结核的特征及成因. 北京:地质出版社, 1993
3 阎葆瑞. 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, 1994
4 Monty C L V. Les nodules de manganese sont des stromatolites oceaniques. C R Acad Sci Paris, Ser D, 1973, 276:3 285~3 288
5 华东石油学院教研室. 沉积岩石学. 北京:石油工业出版社, 1982
6 边立曾,林承毅,张富生. 深海锰结核的描述方法及术语. 南京大学学报, 1996, 32(2):287~294
7 林承毅,边立曾,张富生. 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, 1996, 41(9):821~824
8 张富生,边立曾,林承毅. 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, 1995, 1(1):109~116
9 国家海洋局. 东太平洋多金属结核资源调查(1987~1990). 北京:海洋出版社, 1996. 219~224
10 布洛克 T D. 微生物生物学. 四川大学译. 北京:人民教育出版社, 1981
11 史君贤. 锰细菌对锰铁金属离子的转换作用. 海洋学报, 1996, 18(4):85~89
12 钱江初, Mellin T A. 1 nm 锰矿相的金属阳离子交换能力的研究. 海洋学报, 1996, 18(4):56~62

(1996-09-23 收稿, 1996-12-24 收修改稿)