

中太平洋海山多金属结壳的成矿特征

张海生¹ 赵鹏大² 陈守余² 胡光道²

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012; 2. 中国地质大学数学地质遥感地质研究所, 武汉 430074)

摘要: 根据我国大洋多金属结壳的调查资料并结合其他相关的研究结果, 对中太平洋海山区多金属结壳的类型、产状、成分、结构、分布等成矿特征进行了初步的研究. 结果表明, 中太平洋海山区富钴结壳广泛发育, 但成矿特征较大地受地形、水深、基岩类型等成矿环境因素的影响与制约.

关键词: 多金属结壳; 成矿特征; 海山; 中太平洋.

中图分类号: P744.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)02-0205-05

作者简介: 张海生, 男, 研究员, 1960年生, 现为中国地质大学(武汉)在职博士研究生, 主要从事极地和大洋矿产资源与环境研究.

0 引言

多金属结壳是一种水化成因、生长于大洋硬质基岩上的“壳状”沉积物. 有关研究资料表明, 结壳含 Mn, Co, Pt, Ni, Pb, Au, Ti, Ce 等多种金属, 其中 Co 的含量尤为显著, 最高可达 2%, 明显高于多金属结核. 因此, 多金属结壳亦被称之为富钴结壳. 与赋存于大洋深海盆地的多金属结核不同, 富钴结壳的产出深度相对较浅, 其分布范围一般不超过 800~3000 m. 这使相当一部分结壳的分布位于有关国家的专属经济区(EEZ)内, 并大大减少了开采难度. 由于结壳富含多种重要的金属物质, 不仅具有潜在的巨大经济价值, 且产出深度相对较浅, 因此富钴结壳已成为继深海多金属结核之后一些国家争相调查和研究的又一种重要的多金属矿产资源^[1,2], 其资源状况和相应的成矿地质理论深受世界各国政府和学术界的重视与关注.

富钴结壳最早发现于 20 世纪 50 年代末, 从 20 世纪 60 年代直至 80 年代初, 海山富钴结壳一直被视为深海结核的一种特殊的端员类型加以研究^[3,4]. Mennard 于 1964 年曾注意到产于太平洋海山区的多金属结壳中 Co 的含量明显高于其他结核

的成矿特征. 随后, Cronan(1969)和 Frezer(1980)又进一步发现了海山多金属结壳中 Co 的含量与水深之间的关系, 指出铁锰沉积物的富 Co 区主要集中在西太平洋和南太平洋的高地形区(据文献^[3,4]). 但系统开展富钴结壳的研究则始于 20 世纪 80 年代初. 1981 年, 前西德“太阳号”调查船在中太平洋海山区首次对富钴结壳进行了专门的资源调查和研究^[4,5], 获得了结壳形态、厚度、产状、成分、矿物学和成矿环境的资料, 并初步圈出了结壳富集区的大致范围. 随后, 前苏联、美国、英国、日本等国也相继在太平洋海山区开展了调查^[6,7]. 这些工作不仅揭示了富钴结壳作为资源开采对象加以研究的开端, 并使中太平洋海山区成为迄今大洋富钴结壳资源调查和研究最为广泛和深入的地区. 但是, 这些调查和研究主要限于有关国家的专属经济区内成矿地质环境较为理想的区域, 而对另一部分分布于国际海域的富钴结壳的调查与研究相对较少. 因此, 对这一海区富钴结壳的成矿环境或成矿特征的认识不尽透彻. 为深入开展大洋矿产资源的调查与研究, 我国于近几年来在前期大洋多金属结核资源勘查的基础上, 又进一步开展了大洋富钴结壳资源的调查与研究. 本文根据这些调查资料并结合其他相关研究结果, 对中太平洋有关海山区富钴结壳的成矿特征作一初步研究.

收稿日期: 2000-12-20

基金项目: 国土资源部矿产资源定量预测及勘查评价开放研究实验室资助项目.

1 结壳的类型与产状

调查区海山富钴结壳的类型多样,但其形态,基本上可分为结壳、结壳状结核和结核三类,其中结壳(或称被状结壳)是海山富钴结壳的主要类型。结壳状结核(也称之为球状和似球状结壳)为结壳和结核的过渡型,一般据其产状、成分、成因及成矿环境等特征可分别称之为结核或结壳。

(1)结壳。结壳的产状各异,但主要呈板状、块状、层壳状。总体来看,结壳上表面较光滑,下表面粗糙。结壳呈层状生长,厚度变化较大,最厚的可达几十 cm,最薄的不超过 1 mm。对于 1~10 mm 的结壳习惯上称之为结壳皮,而 1 mm 以下的结壳,称为铁锰薄膜。从工业利用的角度来看,只有厚度大于 1 cm 的结壳才有价值。

(2)结壳状结核。结壳状结核为结壳和结核的过渡形态,形似结核,但核心较大,壳层较薄,颜色为黑或黑褐色。结壳状结核分布较普遍,多呈球状、连体状、瘤状、板状、块状、生物状等多种形态,粒径一般大于 3 cm,表面特征与结壳相似,上表面较光滑,下表面粗糙。结壳状结核的壳层厚度呈上厚下薄的特征,与核心基岩有一定关系,根据观察结果,以火山岩(包括玄武岩、火山角砾岩、火山凝灰岩)为核心的结壳状结核要比以沉积岩(碳酸盐岩等)为核心的结壳状结核壳层厚度大。结壳状结核的核心岩性与结壳基岩类型相仿,主要有玄武岩、泥岩、碳酸盐岩、火山角砾岩、礁灰岩、火山凝灰岩等。

(3)结核。结核在结壳产出深度内所占比例较少,其组成主要与水深有关,一般分布于水深大于 3500 m 的区段,浅水区的低洼处也是其重要的生存场所。结核多呈球状、瘤状、椭球状、菜花状、连体状、不规则状等形态,以球状、瘤状光滑型结核为主。结核为黑色、褐黑色,粒径一般小于 3 cm,以 1~3 cm 为主,少量大于 3 cm。壳层大体可分为 2~4 层,各壳层围绕核心呈同心环带生长。结核的核心物质和结壳、结壳状结核的基岩核心物质差不多。

2 结壳的元素组成与矿物特征

2.1 元素组成

分析结果表明,富钴结壳含多种元素,但相对地壳丰度而言,属高度富集型的元素主要有 Mn, Co,

Ni, Cu, Zn, Pb, Mo 及 REEs。前者比地壳丰度高出约 1~4 个数量级,后者 REEs 则约是其地壳丰度的 10 多倍。其次为 Fe, Ti, P 等元素。元素在海山富钴结壳中的丰度特征是结壳在生长过程中各种地质地球化学作用的综合表现,也是富钴结壳资源评价的基础。研究结果表明,调查区海山结壳中主要成矿元素的地球化学相主要体现出 Mn 组元素(如 Ni, Cu)含量显著降低,而 Fe 组元素(如 Co, REEs)和生源元素 P, Ca 含量明显增大的变化特征。这进一步证实了结壳具有与结核不同的成因机制的观点和富钴的资源特征^[8,9]。

2.2 矿物特征

富钴结壳的结晶程度很差,其矿物组成,尤其是其中的铁矿物,常规的显微镜方法不能对其进行鉴定,只有用穆斯堡尔谱或 X 射线衍射分析才能进行准确的鉴定。经对调查区海山多个样品的分析,结果表明海山结壳矿物主要由三部分组成,即锰矿物、铁矿物和杂质矿物。

锰矿物为结壳的主要矿物,分析结果显示所有样品都具有 2.45×10^{-10} m 和 1.42×10^{-10} m 两个强峰,这表明结壳主体矿物组分为水羟锰矿。除水羟锰矿外,在个别样品中还发现了比较明显的 9.97×10^{-10} m 峰,说明结壳中尚存在少量的钡镁锰矿。铁矿物在结壳中少量存在。根据 X 射线衍射和穆斯堡尔谱及其参数特征判定,所有结壳样品中的 Fe 均以三价形式存在,而且所有的铁矿物均为 β 羟铁矿,即以 β -FeOOH 形式存在,这表明海山结壳在铁矿物组成上一致,均为羟铁矿。在个别站位(样品)中出现了两种铁矿物,赤铁矿和磁铁矿。从结构上比较,赤铁矿在上壳层中较多,而磁铁矿在下壳层中较多。从穆斯堡尔谱分析结果看,调查区海山结壳中铁矿物的成因无本质差别。结壳中的杂质矿物主要是由碎屑、粘土或自生矿物组成,杂质组分的种类较多,主要有石英、斜长石、磷灰石、高岭石、方解石、云母等,其来源不尽相同。这些杂质矿物主要是由结壳生长期间同期所发生的沉积作用掺杂的结果。在结壳生长期沉积作用的强度将直接影响结壳的纯度。

3 结壳的结构与构造特征

结壳是一种铁锰氢氧化物和氧化物的沉积,其组成矿物极其微细,一般难以分辨,为非晶质结构。从宏观上看,结壳一般具有双层结构,下层为泥质包

裹体的疏松多孔体,上层为致密层,其厚度通常为下层的两倍左右^[10]。上下两层还可分成若干层,壳层的多少则依不同个体而有差异。经显微鉴定,调查区海山结壳最多可分 8 层。从上往下依此可分为:(1) 黑色致密状层,平均厚 5 cm;(2) 黑色致密块状层,2 cm;(3) 亮黑羽状致密细层,3 mm;(4) 铁褐色致密层,7 cm;(5) 亮黑羽状细层,1.5~2 cm;(6) 黑色致密块状层,1 cm;(7) 煤渣状含钙质壳层,1.5~2 mm;(8) 黑色致密块状层,1 cm。

结壳的宏观构造统称为层状构造,并可细分为板层状和圈层状两种。板层状构造结壳层呈二维展布,可以是单层,也可以为多层,厚度有大有小,层面平坦或起伏。这种构造一般发育在面积宽广、坡度平缓的基底上;圈层状构造结壳层围绕一核心呈同心圈层状生长,是结壳状结核特有的一种构造。结壳与结核一样,可以围绕一个核心向外生长,这与其形成“基底”的不稳定性有关。核心较小时,圈层等厚;核心较大时,上层较厚,下层较薄。如果按壳体的疏密程度分,结壳的宏观构造又可分为多孔状构造、煤渣状构造和致密块状构造。多孔状构造、煤渣状构造多见于结壳与风化基底的界面处,而致密块状构造是结壳在沉积作用较弱时稳定生长的标志。

结壳宏观特征较为简单,但其显微构造却十分复杂。结壳的壳层在显微镜下形态多样,根据形态特征,显微构造大体上可分为柱状构造、不规则状构造、水平纹层状构造、波浪纹层状构造、岛屿状构造等。柱状构造的纹层叠置形成如叠层石状的柱体。柱体有时出现分叉与合并现象,并且有平行柱体延伸方向的间隔柱体的沉积物杂质。在沉积物不连续分布的地方,相邻柱体部分纹层过渡相连。不规则构造的纹层生长方向、厚度、连续性均受到破坏、干扰,纹层组形态不规则,方向紊乱,纹理厚度不一。纹理间或纹层组合间充填了许多其他物质。岛屿状构造的纹层组被大量的沉积物完全分隔,呈形态不一但封闭的孤立岛屿状,其生长方向较难判断。平行纹层状构造的纹层形态为近水平的平行带状,其间沉积物杂质较少,不易分辨。波浪纹层状构造的纹层为连续波浪状,纹层间沉积较少。贝纹状构造的纹层组呈扇状,形似贝壳纹饰。沉积物杂质含量多,分隔了纹层组,有部分纹层如网脉状连接;鲐状构造的纹层组为鲐粒状。沉积物较多,呈网脉状分隔单体,网脉体较宽。鲐粒间也有纹层粘连现象,鲐粒中似有核心;火焰状构造有些类似贝纹状构造,纹层组可见柱

状、扇状、不规则状构造形态,其边缘纹层形似火焰。以上除柱状、平行纹层状、波浪纹层状 3 种显微构造显示结壳生长环境较稳定外,其他几种构造都是在不同程度的动荡环境形成的。结壳与结核壳层中的纹带极其类似,它们都具有叠层石构造特征。

4 富钴结壳的分布特征

富钴结壳(包括结壳和结壳状结核)大多分布于碳酸盐补偿深度(CCD)以下水深 800~3 000 m 的海山、海台顶部和斜坡上,而调查区海山结壳主要分布于水深 1 600~3 500 m 的范围内,大于 3 500 m 才以结核形式出现。板状结壳与水深的关系不很大,在 1 600~3 000 m 的水深段连续分布。结核状结壳主要出现在深水区,但浅水区的低洼处也是其重要的发育场所;砾状结壳的大型个体以原地附近生长为主,小型个体和结核状结壳相似,以坡脚为主。

深海连续照相剖面资料显示,海山平顶不利于结壳生长,在海山顶部波纹状礁灰岩沉积区几乎无结壳分布(图 1a)。由海底平顶山顶部平坦沉积区向外和向下渐变过渡为结壳区,由于受碳酸盐沉积作用的影响,该区结壳表面常覆有少量珊瑚砂(图 1b)。据此可以判断结壳分布上限在海山顶部平坦区以外的坡面转折处。结壳基本上呈被状沿山坡连续分布,其展布形状主要受海山基岩表面形态控制,可随基岩的原始表面形态形成杂波状、台阶状和平板状展布(图 1)。在海山坡度较大处,熔岩表面一般较平滑,上面的结壳多呈平板状,而在坡度较小处,熔岩冷却时较易形成枕状、波状表面,结壳也可继承这些形貌特征显示为波纹状或枕状。在个别情况下,不同的水动力条件也可能影响结壳的展布形态。海山的地形坡度对结壳生长影响较大,其影响大体表现为:缓坡处结壳较厚,而陡坡处较薄。平缓地形较利于结壳长期稳定生长,结壳发育良好;平缓低凹的地形对砾状结壳、结核状结壳生长有利,而在地形陡峭处,结壳生长过程中易发生滑塌,故结壳发育较差。

尽管调查结果表明结壳在海山斜坡上广泛发育,但不同海山或同一海山不同区段结壳的丰度和总量明显不同。水下照相、水下电视及地质采样资料显示,某些海山或海山区段上的结壳覆盖率几乎可达 100%,但有的不足百分之几或空白(图 1)。值得注意得是,有些海山或区段尽管结壳覆盖率较高,但地质采样结果表明结壳仅以结皮形式存在,给人以

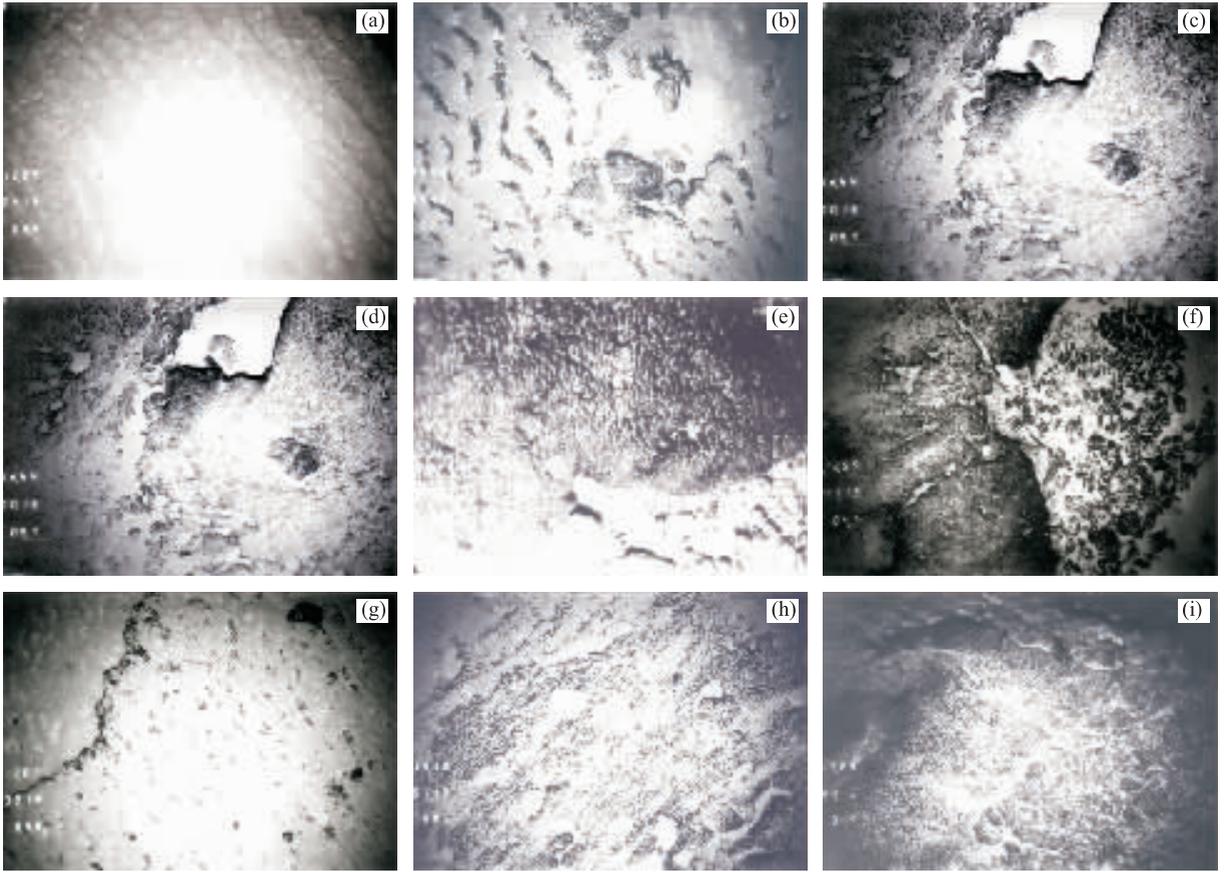


图 1 结壳在海山的分布

Fig. 1 Distribution of nodule and crust in central Pacific ocean seamount

a. 海山台顶; b. 海山坡折; c~i. 山坡连续分布图

假象. 与此相关, 调查区海山各站位结壳厚度的变化范围也较大, 从小于 0.2 cm 到 17 cm 不等. 所调查的数座海山的平均壳厚也各不相同, 平均为 2.79 cm. 受覆盖率和厚度的影响, 海山各站位结壳丰度的变化明显, 从小于 5 kg/m^2 到大于 100 kg/m^2 , 差异极大.

海山结壳的分布受多种因素的制约, 除地形和物化条件外, 水深和基底类型的影响较大. 结壳丰度随所处水深不同而有所变化, 但不同海山情况也不尽相同^[6,10]. 在调查区的水深范围内 (1 600~3 500 m), 以 A、B 两座海山为例, A 海山在 2 000~2 500 m 的调查区段丰度最高, 平均为 107.18 kg/m^2 , 其上部 1 700~2 000 m 区段的丰度为 83.4 kg/m^2 , 下部 2 500~3 000 m 区段的丰度最小, 仅为 33.06 kg/m^2 ; 而 B 海山在 1 700~3 000 m 的水深范围内丰度随水深增大逐渐升高, 在 2 500~3 000 m 达到最高值 (173.39 kg/m^2), 向下增大到 3 000~3 500 m 丰度降低为 80.02 kg/m^2 .

结壳可生长在海山任何硬质的基底上, 基底类型对结壳分布和生长的影响主要取决于其硬度、稳定性和牢固性. 调查区海山结壳生长的基底大致可分为火山岩、沉积岩、半固结的沉积物、硬质生物残骸 4 类, 以前两种为主要基底类型. 研究表明, 以火山岩为基底的结壳丰度、品位均较高. 调查区中的火山岩主要为玄武岩, 部分为火山角砾岩. 火山岩有利于结壳生长的原因主要是它可以提供结壳生长所需的多种金属成矿元素, 长期的海解作用可使火山岩中的金属元素分离出来, 进入周围的水体, 然后通过化学或生物作用形成结壳. 据观察, 新鲜的火山岩表面壳层微薄. 风化程度越深, 上附壳层就越厚. 作为结壳基底的沉积岩主要有以下几种: 碳酸盐岩、燧石岩、泥岩、粉砂岩, 其中以碳酸盐岩为基底的结壳最厚, 泥岩、粉砂岩次之, 燧石岩最薄. 沉积岩表面的结壳比火山岩表面的结壳薄许多, 平均只有几 mm; 个别海山存在大量的钙质沉积物——有孔虫软泥, 其中一部分已固结. 在固结软泥表面也可生成

一层薄薄的结壳,但厚度较薄,约为 1~2 mm。钙质沉积物附生结壳的现象,说明结壳生长的基底主要取决于其硬度、稳定性和牢固性,而与基底的组成物质无多大关系,这一点与多金属结核一致;个别站位还发现有生长在螺壳类生物残骸上的结壳,这些铁锰物质附着在螺类硬壳内、外表面上,壳厚达 2~4 mm。但是,不同的基岩表面赋存的结壳在厚度和丰度方面差别很大,在个别海山出现以有孔虫灰岩为主的碳酸盐岩上结壳最厚,平均达 6 cm,次之为磷酸盐化碳酸盐岩,平均为 4 cm,硅质岩对结壳的形成最为不利。另外,海解风化强烈的岩石表面结壳厚度则明显大于新鲜岩石,对火山岩来说尤其如此。对基岩类型与结壳生长和分布的关系,将另作详细讨论。

参考文献:

- [1] Cronan D S. Marine minerals in the EEZ [M]. [s. l.]: Chapman and Hall, 1992. 209.
- [2] Manheim F T. Marine cobalt resources [J]. *Science*, 1987, 232: 600~608.
- [3] Glasby G P, Andrews J E. Manganese crust and nodules from the Hawaii ridge [J]. *Pacific Science*, 1977, 31: 363~379.
- [4] Halbach P, Manheim F T. Potential of cobalt and other metals in ferromanganese crust on seamounts of the cen-

- tral Pacific basin [J]. *Marine Mining*, 1984, 4: 319~336.
- [5] Halbach P, Sattler C, Teichmann F, et al. Cobalt-rich and platinum-bearing manganese crust deposits on seamounts: nature, formation, and metal potential [J]. *Marine Mining*, 1989, 8: 23~39.
- [6] Claude P, Michel H. Characteristics of Co-rich ferromanganese nodules and crust sampled in French Polynesia [J]. *Marine Geology*, 1987, 77: 109~119.
- [7] James R, Manheim F T, Suwab W C. Ferromanganese crusts from Necker ridge, Horizon guyot and S. P Lee guyot: geological considerations [J]. *Marine Geology*, 1985, 69: 25~54.
- [8] Hein J R, Gramm-Osipov L M, Gibbs A E, et al. Description and composition of Fe-Mn crusts, rocks and sediments collected on Karin ridge [R]. USGS Open File Report 94-230, 1994. 39~86.
- [9] Decarlo E H, McMurtry G M, Kim K H. Geochemistry of ferromanganese deposits from the Kiribati and Tuvalu region of the west central Pacific ocean [J]. *Marine Mining*, 1987, 6: 302~321.
- [10] Puteanus D, Glasby G P, Stoffers P, et al. Distribution, internal structure, and composition of manganese crusts from seamounts east of the Teahitia-Mehetia Hot Spot, Southwest Pacific [J]. *Marine Mining*, 1989, 8: 245~266.

MINERALIZING CHARACTERS OF COBALT-RICH FERROMANGANESE NODULE AND CRUST IN CENTRAL PACIFIC OCEAN SEAMOUNT

Zhang Haisheng¹ Zhao Pengda² Chen Shouyu² Hu Guangdao²

(1. *The Second Oceanic Institute of National Ocean Bureau, Hangzhou 310012, China*; 2. *Institute of Mathematical Geology and Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*)

Abstract: The mineralizing characters relating to type, shape, composition structure and distribution of cobalt-rich ferromanganese nodule and crust in Pacific ocean seamount have been discussed by investigating information of two surveyings and using the other data. The results indicate that the cobalt-rich development in central Pacific oceanic seamount area, and the mineralizing characters are controlled by the environmental factors, such as landform, water depth and rock types.

Key words: ferromanganese nodule and crust; mineralizing character; seamount; central Pacific ocean.