

海底多金属铁锰结核的构造及成因

EPMA-033

摘要：海底多金属结核潜在的经济资源价值及科学意义受到各个国家重点关注。多金属铁锰结核的形态、结构构造、矿物种类和化学成分综合反映了结核的形成环境和生长机制。使用岛津电子探针 EPMA 对某地海底采集的多金属铁锰结核进行了微观形貌观察、成分分析和元素面分布特征测试。电子探针分析结果表明，该多金属铁锰结核的原始成核物质来源于海底喷发的火山岩碎屑，成核边部具有火山玻璃特征。多金属铁锰结核形成初期为一个长时期的快速生长期，其主要形貌为方向性不明显的花瓣状构造，然后叠加了沿结核生长方向扩展的纹层状形态。结核生长过程中，Mn+Ni+Cu 和 Fe+Co 元素分布具有强烈的负相关，表明了铁锰结核生长速度的交替，反应了当时复杂多变的海洋环境。

关键词：铁锰结核；构造；矿物成分；元素分布；电子探针

据统计占地表 71% 的海洋环境中约有 15% 的左右的面积被多金属结核 (即铁锰结核或锰结核) 所覆盖，是海底最重要的固体金属矿产。多金属结核中含有 50 多种元素，尤为富集 Cu、Co、Ni、Mn 等多种战略金属元素，资源储量巨大，潜在经济价值备受各国瞩目。此外，多金属结核一般以几到十几毫米每百万年的速度极慢的生长，其生长发育状况不仅取决于生长时的

大洋环境，而且与赋存位置当时所处的地形地貌、地壳运动、洋流活动、海洋生物迁徙以及古海洋气候变化等因素存在着密切的关系，形成环境的差异使其微观形貌和元素组成特征不同。多金属结核及生长过程中因为记录着这些海洋地质作用及变化的信息，也受到相关学者的关注。

■ 实验部分

1.1 仪器

岛津 EPMA-1720 电子探针显微分析仪

1.2 分析条件

加速电压：15 kV

束流：面分析 200nA、定量分析 20nA

束斑直径：面分析 MIN、定量分析 10 μ m

测试时间：面分析 50ms/point、定量分析 10s

1.3 样品处理

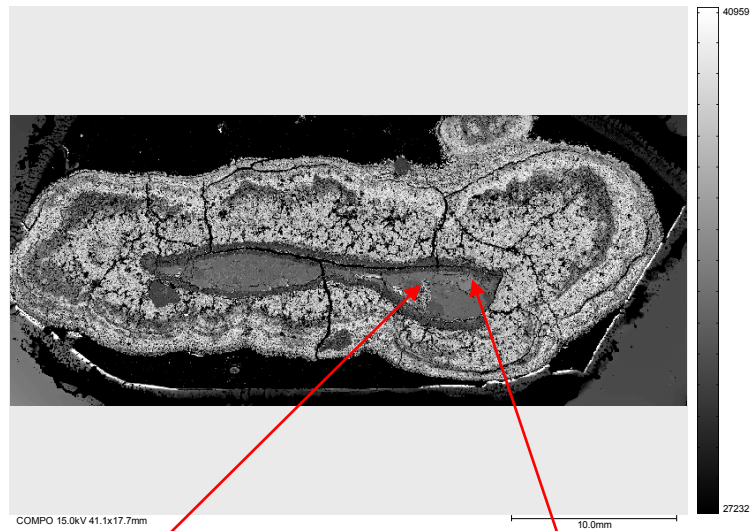
采集的试样委托专门的制样公司进行地质薄片的制作，表面进行蒸镀碳膜以增加试样表面的导电性。经透射偏光显微镜观察确定大致的测试位置后，使用电子探针进行测试。



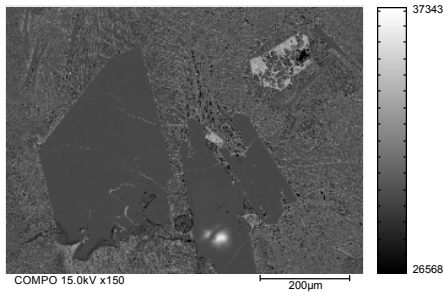
■ 结果与讨论

2.1 中心核部组成形貌及矿物特征

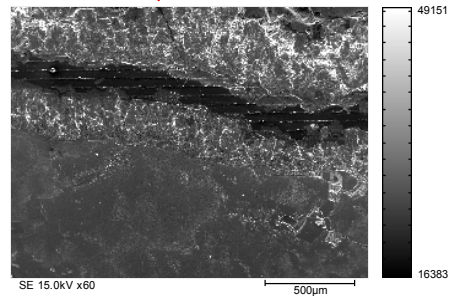
火山岩碎屑、生物骨骼碎块、沉积物泥块、老结核碎块等固结物，都可以成为铁锰结核中或大或小的最初形核核心。试样的中心成核部位发现了较多的全形斑晶，斑晶主要为长石与辉石，可能来自于海底火山喷发在海水中的冷却结晶，在火山岩碎屑基质中还有后期充填形成的杏仁体构造，来自于火山岩浆冷却后期逸出的残留气体通道。在火山岩碎屑边部也观察到快速冷却的火山岩玻璃晶相特征。



(a) 铁锰形核整体形貌

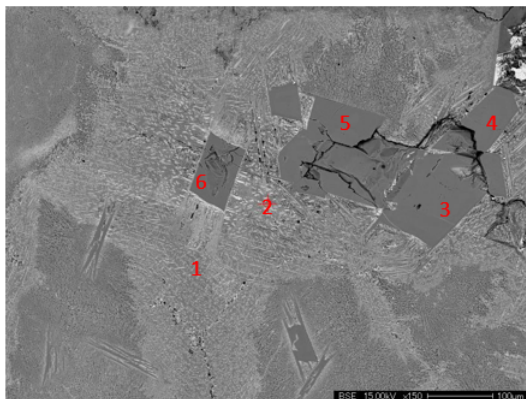


(b) 内部的大斑晶

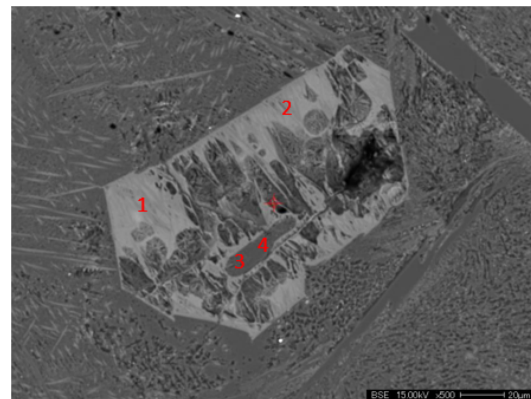


(c) 核部边缘的火山玻璃

图 1 核心微区形貌特征



(a) 1# 斑晶形态，长石为主



(b) 2# 斑晶形态，含辉石

图 2 核心斑晶的定量测试位置

表 1 核心位置定量测试结果 (Wt%)

Data	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	MgO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	MnO	CuO	Total
1-1	2.94	47.97	1.44	2.09	1.36	8.58	18.41	9.44	0.10	0.14	0.01	92.48
1-2	2.77	46.25	1.73	2.74	0.96	9.97	16.99	10.45	1.63	0.17	0.00	93.66
1-3	3.06	47.19	0.04	0.28	0.03	0.65	30.40	14.47	0.01	0.00	0.00	96.13
1-4	3.21	47.89	0.04	0.30	0.03	0.72	29.83	14.09	0.00	0.02	0.00	96.12
1-5	3.17	48.40	0.09	0.29	0.09	0.75	30.26	13.89	0.02	0.02	0.01	96.99
1-6	3.26	48.00	0.09	0.30	0.03	0.76	30.24	14.04	0.00	0.04	0.00	96.75

Data	Na ₂ O	SiO ₂	TiO ₂	MgO	K ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	BaO	MnO	CuO	CoO	NiO	Total
2-1	1.23	2.30	0.71	3.36	0.85	8.46	2.08	1.21	0.47	0.53	55.48	0.89	0.19	0.00	77.76
2-2	0.57	7.74	1.22	3.27	0.44	34.78	4.77	0.95	0.33	0.28	31.67	0.67	0.13	0.00	86.82
2-3	2.99	55.90	0.79	1.32	0.95	4.78	22.12	7.95	0.11	0.00	0.33	0.00	0.00	0.00	97.24
2-4	3.49	54.46	0.97	1.35	1.36	5.23	22.15	7.70	0.14	0.04	0.34	0.00	0.01	0.00	97.22

2.2 结核层的形貌及元素分布特征

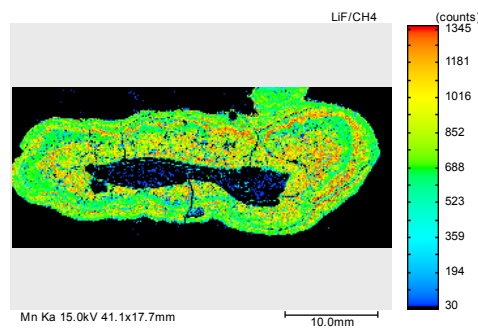
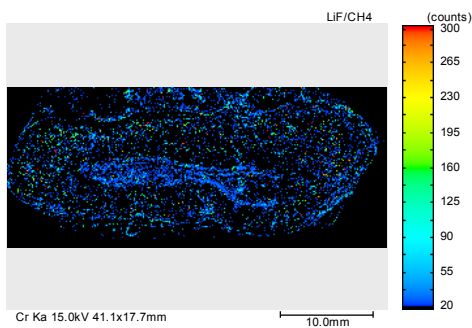
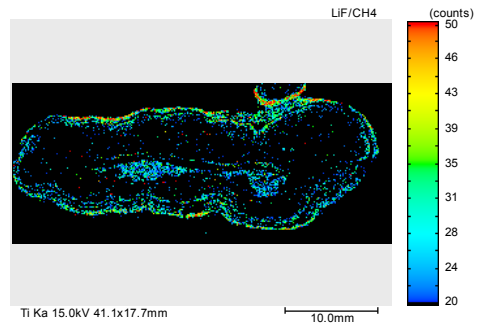
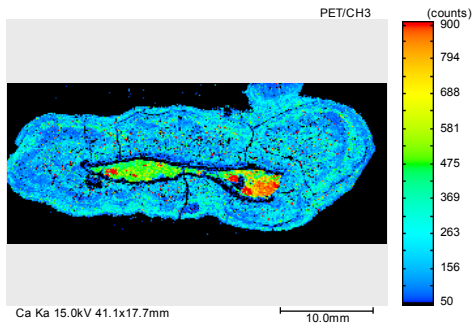
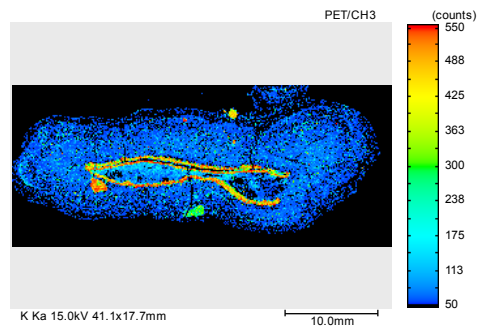
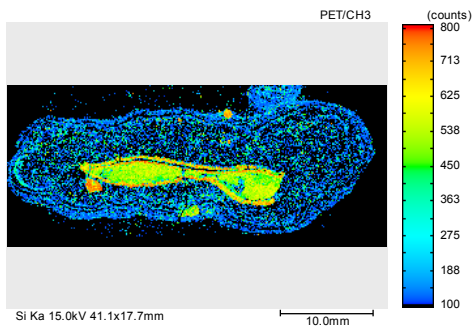
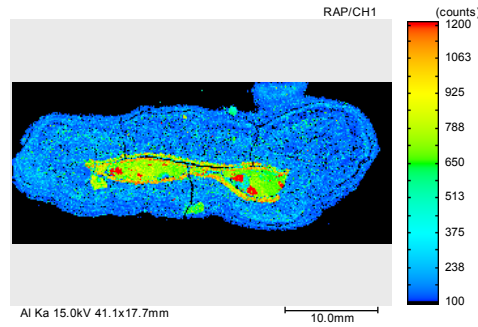
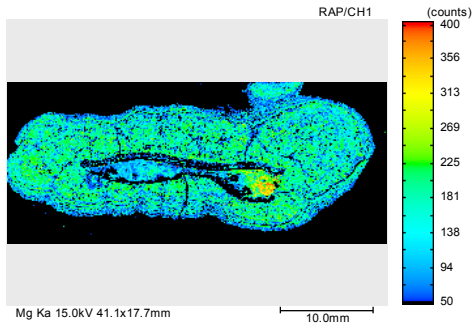
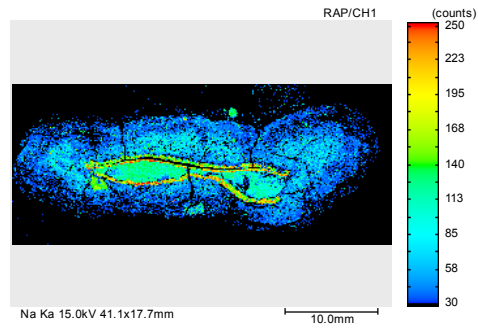
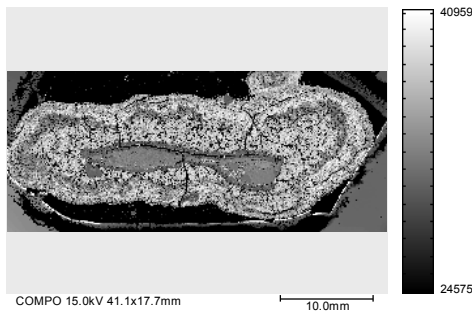
岛津电子探针 EPMA 通过配置兼具灵敏度和分辨率的全聚焦分光晶体以及 52.5° 的特征 X 射线高取出角，对于检测微量元素的微量变化分布具有很高的灵敏度。

对此铁锰结核的整体元素分布情况进行面分布扫描，结果见图 3，从结果中我们可以直观地观察元素之间的相互关系。可以看到成岩元素 Na、Al、Si、Ca 和 Fe 主要分布在核心位置，从 K、Si、Al 元素的分布上也能明显地观察到核心外层分层的快速冷却的火山玻璃相。

针对核心外的结核层，主要形貌特征观察见图 4，在相对内层为花瓣状构造，外层的纹层状构造，以及最外层的斑杂状及瘤状形态。

根据铁锰结核的物质来源不同，全球海底的铁锰结核主要分为水成型、成岩型和混合型（上半部分为水成型、下半部分为成岩型）三种主要类型。结壳层中的 Mn 与 Fe 呈负相关，表明铁锰结核中 Mn 以成岩来源为主，大量成岩 Mn 对 Fe 的稀释作用使 Fe 含量降低。

据文献报道大洋多金属结核生长速率与化学成分之间有着密切的关系，生长速度较快的结核往往富集 Mn、Ni 和 Cu，而相应地 Fe、Co 含量较低；而生长缓慢的结核则多富集 Fe、Co，而 Mn、Ni 和 Cu 的对应位置含量则较低。Co 元素在多金属结核的生长过程中被吸收进入结核层的速率基本稳定，结核中 Co 含量与生长速率具有以下相关关系：结核生长速率越快，Co 含量越低，反之 Co 含量越高。根据相关元素的协变关系，结合图 3 的元素分布特征，表明该多金属结核的初期经历了一次较长周期的快速生长，形貌特征呈较为疏松的花瓣状和纹层状构造，其后经历了反复多次的快速和慢速结核的交替，反映了当时复杂多变的海洋地质环境，最外层是慢速生长的瘤状富 Fe、Co 外壳。整个结核壳层中，相对于内部原生构造的花瓣状和纹层状构造形貌，外面几层有裂隙及充填脉状形态，可能来自于次生构造。



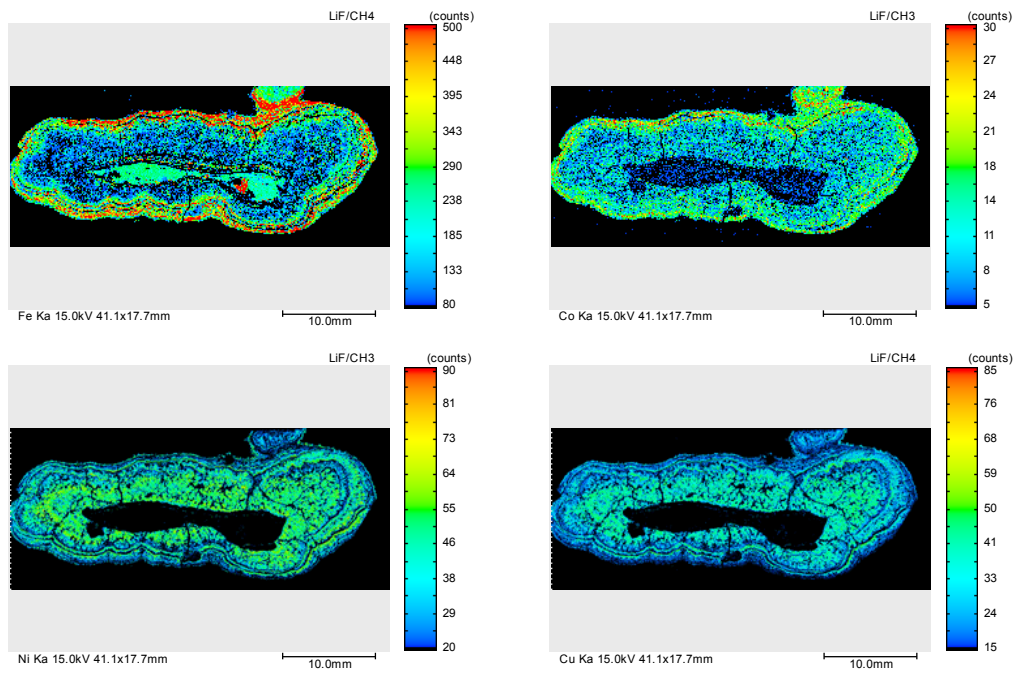


图 3 铁锰结核核心及结壳层元素分布特征

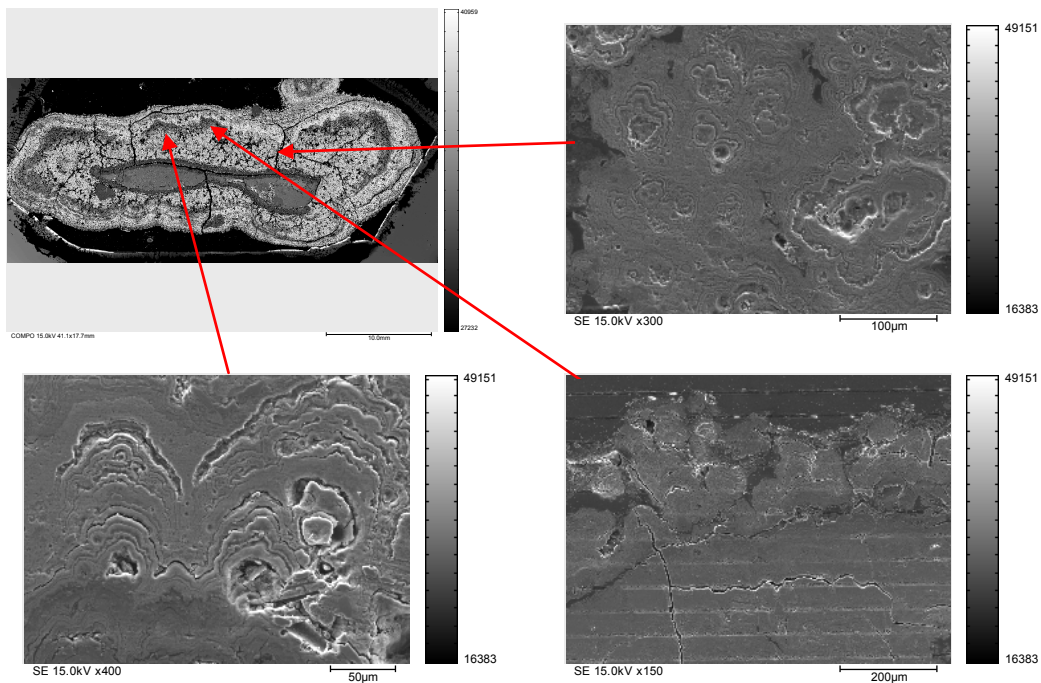


图 4 结壳层的形貌特征

■ 结论

多金属铁锰结核的形态、内部结构构造、矿物种类、形态和化学成分综合反映了结核的形成环境和生长机制。核心部位的成核物质来源于火山岩碎屑，在冷却过程中形成长石和辉石斑晶，形成了最早的结核物质，核心周围具有明显的火山玻璃成分和形态。来源于大陆岩石风化、海底火山及热液、海底岩石的溶解和沉积物的成岩作用等过程赋予了海洋以丰富的 Mn、Co、Fe、Cu、Ni 等结核生长元素。复杂多变的海洋环境形成了铁锰结

核复杂的生长形态，显微形貌和元素分布表明，此铁锰结核在形核后的最初阶段经历了一次长周期的快速生长，此后是反复多次的慢速和快速的结核过程，最外层形成了富 Fe 和 Co 的不平滑的瘤状外壳。

岛津电子探针 EPMA 通过使用兼具灵敏度和分辨率的全聚焦分光晶体和 52.5° 的特征 X 射线高取出角，对于元素的微量变化分布测试能够获得很好的效果，对于数据的解读说明可以给予直观地展示。

岛津应用云

