



# 多金属结核 (一)

- 化学成份
- 形成理论
- 地理分布
- 勘探技术
- 加工技术

## 矿物性质

多金属结核是十九世纪末(1868年)在西伯利亚岸外的北冰洋喀拉海中发现的。英国“挑战者”号考察船在进行科学考察期间(1872-76年),发现世界大多数海洋都有多金属结核。

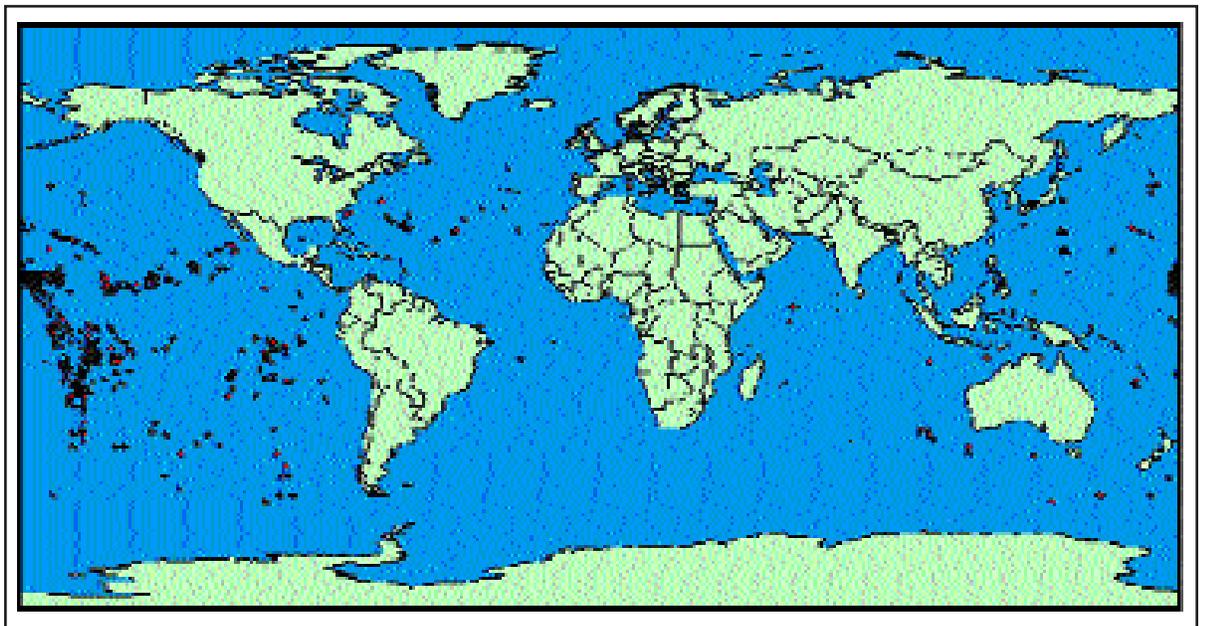
多金属结核又称锰结核,系由包围核心的铁、锰氢氧化物壳层组成的核形石。核心可能极小,有时完全晶化成锰矿。肉眼可见的,可能是微化石(放射虫或有孔虫)介壳、磷化鲨鱼牙齿、玄武岩碎屑,甚至是先前结核的碎片。壳层的厚度和均匀生成的先后阶段决定。有些结核的壳层间断,两面明显不同。结核大小不等,小的颗粒用显微镜才能看到,大的球体直径达20多厘米。不过,结核一般直径在5到10厘米之间,大小如土豆。表面多为光滑,也有粗糙、呈椭球状或其他不规则形状的。底部埋在沉积物中,往往比顶部粗糙。

结核位于海底沉积物上,往往处于半埋藏状态。有些结核完全被沉积物掩埋,有些地方照片没有显示任何迹象,却采集到结核。结核丰度差别很大。有些地方结核鳞次栉比,遍布70%的海底。

但一般认为,丰度必须超过每平方米10公斤,在不足一平方公里范围内,平均丰度要达到每平方米15公斤,才具有经济价值。结核在不同深度海底都存在,但4 000至6 000米赋存量最丰富。



多金属结核



多金属结核全球分布示意图

# 化学

化学成分因锰矿的种类和核心的大小和特征之不同而异。具有经济价值的结核主要成分为锰（29%），其次为铁（6%）、硅（5%）和铝（3%）。最有价值的金属含量较少：镍（1.4%）、铜（1.3%）和钴（0.25%）。其他成分主要为氧和氢，以及钠和钙（各约1.5%）、镁和钾（各约0.5%）、钛和钡（各0.2%）。

\*镍、铜、钴最有价值。

## 结核的形成

各类结核是如何形成的？这方面有好几种理论。两种较为流行的假说是：

1. 水成作用成因：金属成分缓慢从海水中析出，沉淀形成结核体。据认为，水成结核的铁、锰含量相仿，镍、铜、钴品位相对较高。
2. 成岩作用成因：沉积柱内的锰重新活动，在沉积物/水界面析出。此种结核锰含量丰富，但铁、镍、铜、钴含量较少。

## 提出的其他机理有：

- 热液成因：金属来自与火山活动有关的热泉；
- 海解成因：金属成分来自玄武岩碎屑的分解。
- 生物成因：微生物的活动催化金属氢氧化物析出沉淀。

## 共同的因素

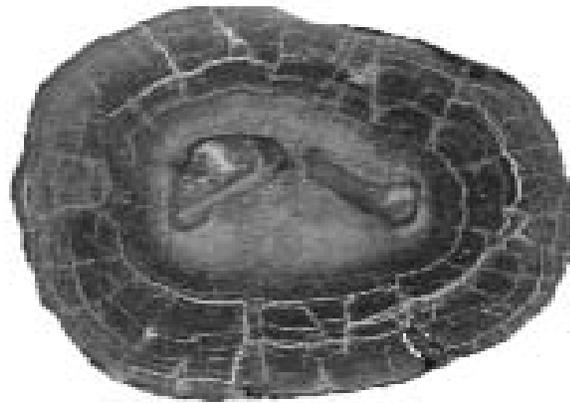
在结核形成期间，上述成因可能有几种是同时或相继发生的。具体而言，不论结核的成因为何，有几个因素是共同的：

1. 结核形成需要低沉积速率或在其沉淀积聚之前有某种刷除沉积物的过程。这样，结核体在被埋藏前得以增长——被埋藏后就不具备发展所必需的条件了。
2. 浮游生物积聚了铜、镍等微量元素，在其死亡后沉降到海底的有机物可能为组成结核的金属来源之一。
3. 海水中的锰主要来自热液喷口（热泉）；热液从洋壳裂缝上涌时，锰从底层的玄武岩中沥滤出
4. 微生物活动进一步促进了结核过程。



多金属结核

结核的生长是最为缓慢的一种地质现象，数百万年才增长1厘米左右。因此，太平洋的结核年龄在二、三百万年之间。不过，据报导，在第一次世界大战期间沉毁的舰船附近，铁锰结核迅速形成。这可能有助于理解结核成分的来源及其凝聚方式。结核形成缓慢，则成因可能是水成或成岩作用；结核形成较快，则其金属来源当不是海水和沉积物。就后一种情形而言，热液成因，甚至海解成因较为可能。

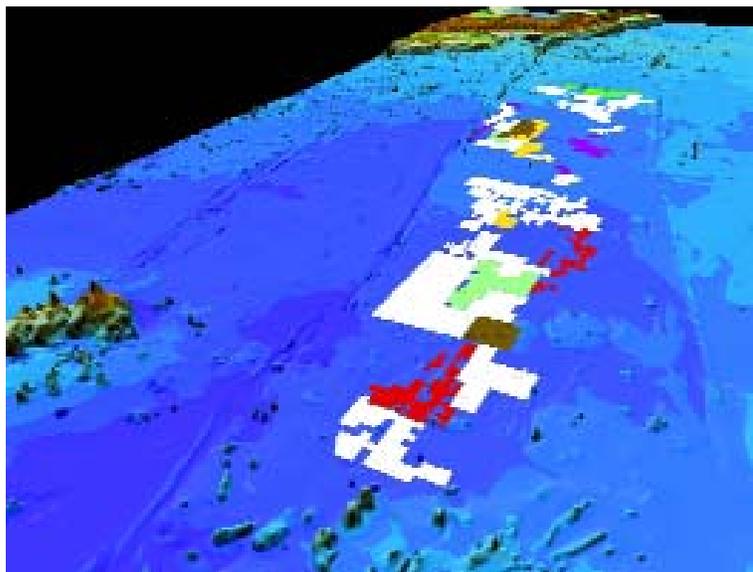


多金属结核切片

应加解释的另一个问题是：沉积速率比结核增长速率高得多，结核为什么还继续留在表层之上？即使是残余放射虫软泥，平均沉积速率也有每千年数毫米。因此，结核应当埋藏在数米深的沉积物之下。一种猜想是，食底泥的底栖生物（多毛类环节动物或益虫）清除结核上最新积聚的颗粒物，将其抛在结核旁边，甚至置于结核之下，从而使结核不至被埋藏。

# 结核的地理分布

所有海洋，甚至大湖中，都发现有结核。不过，具有经济价值的结核区分布有限。工业勘探者选定了三个地区：中北太平洋中心、东南太平洋秘鲁海盆和北印度洋中心。



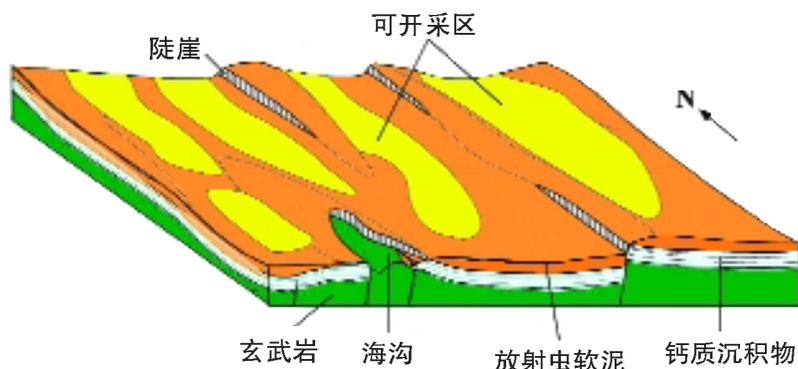
国际海底管理局保留区（白色），图片由英国南安普顿海洋学中心海洋法地球科学组提供，2003年

这些地区海底水深4 000至5 000米不等。海底地形由深海丘陵构成，沿海洋洋壳断崖呈南北走向延伸。洋壳从洋中脊向外扩张，玄武岩断裂之处形成断崖。洋壳移离洋脊，逐步为沉积物所覆盖。

因此，在西经120度至155度间，自东向西，北太平洋沉积物厚度由50米增至150米。山丘顶部相距2至5公里，高出最低地区100至300米。山的两侧有最高达40米的钙质粘土峭壁，顶部有大凹陷。虽然有这些地形障碍，但平均坡度仍不到10度。根据对海底连续照相而进行的地质统计模拟可标示适宜开采的矿区。最佳的矿区宽1至5公里，长10至18公里，呈南北走向，结核丰度为每平方米15公斤的区域可能占海底面积的35%。

1965年，约翰·梅罗估算海底多金属结核总量在1.5万亿公吨以上。1981年，阿切尔把这一估计数减至5 000亿公吨。然而，并非所有的结核矿区都适合开采。曾数次努力测算今后可能开发的资源。这些办法首先是确定全球海洋所含有的矿址数量。矿址的定义是：可以持续商业作业20至25年、每年产出150万至400万公吨“优质结核”的海底区域。优质结核的定义为：平均含有至少1.25%-1.5%镍和1%-1.4%铜以及27%-30%锰和0.2%-0.25%钴。据此估计共有8至225个矿址，推算总资源量为4.80亿至135亿公吨。考虑到其他因素，包括世界金属市场在头20年间吸收有关产品的能力和更严格的采矿假设，矿址进一步减至3到10个，产量减至1亿至6亿公吨。此即所谓“推测估算资源量”。

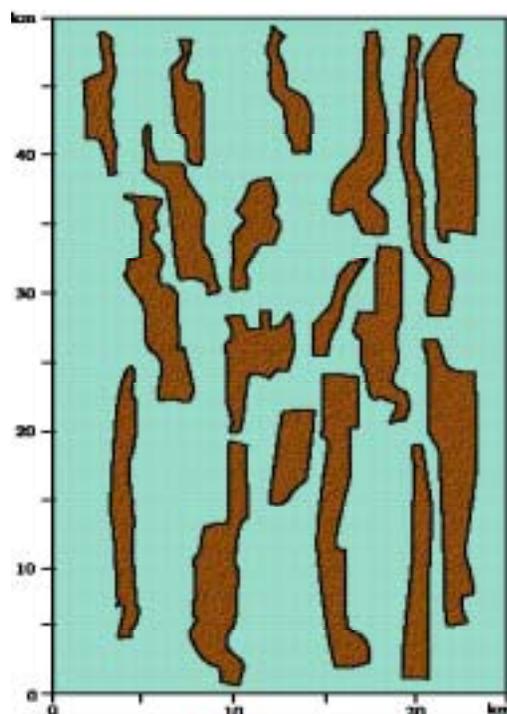
## 多金属结核矿床



2000年1月10日 国际海底管理局 J.P. Lenoble

## 主矿区中的可开采区

法国开辟区中的地质统计模拟



2000年1月10日 国际海底管理局 J.P. Lenoble

# 勘探技术

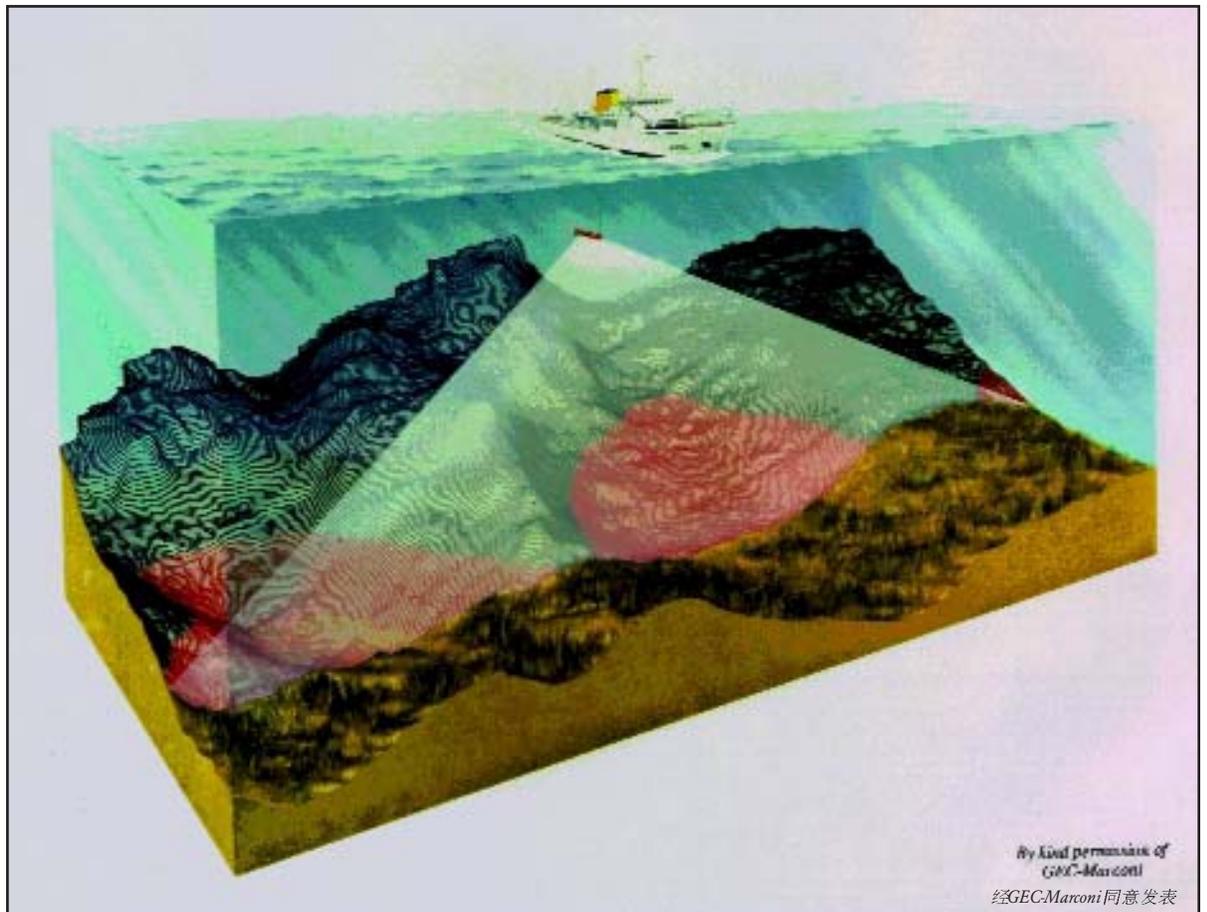
在勘探多金属结核矿床的过程中，研究出了数种技术解决办法。多年来，这些资源的探测和取样技术有了长足进展。本材料对此略作介绍。

## 海底地形

1930年代以来，一直采用回声测深（声纳）技术勘查洋底地形。传统回声测深仪在船底垂直发射宽束（40度）声波。根据从发出声脉冲到接收海底回声之间的时间间隔，可以按照声音在水中的传播速度（每秒约1 500米）算出水深。在船只行进过程中所获得的连续测深数据提供该船航迹下方的地形剖面图。要准确地测绘海底某一区块的地形，就必须行走等距平行航迹。

1970年代末，出现了多波束回声测深仪。设备发射一系列窄束（2度）声波信号，作扇形分布，与船体轴线正交排列。每次发射得出一系列同该船航迹下方及旁侧各点相对应的测深数据。现代化

多波束回声探测仪（侧扫声纳）每一扫描带有150多个测量数据（平均每130米一个数据），覆盖宽达20公里，水深至4 000米的范围，可以辨别许多以前看不见的地形。在船上，一分钟之内即可绘出地图，从而得以实时“阅读”海底某区段的地形。邻接刈幅很容易用电脑拼接。加上精度达1米的全球定位系统，绘出的1: 25 000比例尺地图在准确度上堪与最佳的陆地地形图相媲美。海面测量还以深拖声纳在海底上方测量作为补充。大多数勘探者还以自由升降装置投入海底进行取样、拍照。每次能从0.25平方米地区采集数公斤结核，并对2至4平方米地区拍照。根据所有这些资料，即可以估计海底结核丰度（公斤/平方米）。由电缆操作的抓斗和照相机提供的信息更为可靠，不过速度较慢。声纳技术的最新改进当能促进新装置的开发，以更准确地测量结核分布的密度。这样就能用较短时间勘测大范围内的结核丰度。



多波束回声探测模型

By kind permission of  
GEC-Marconi  
经GEC-Marconi同意发表

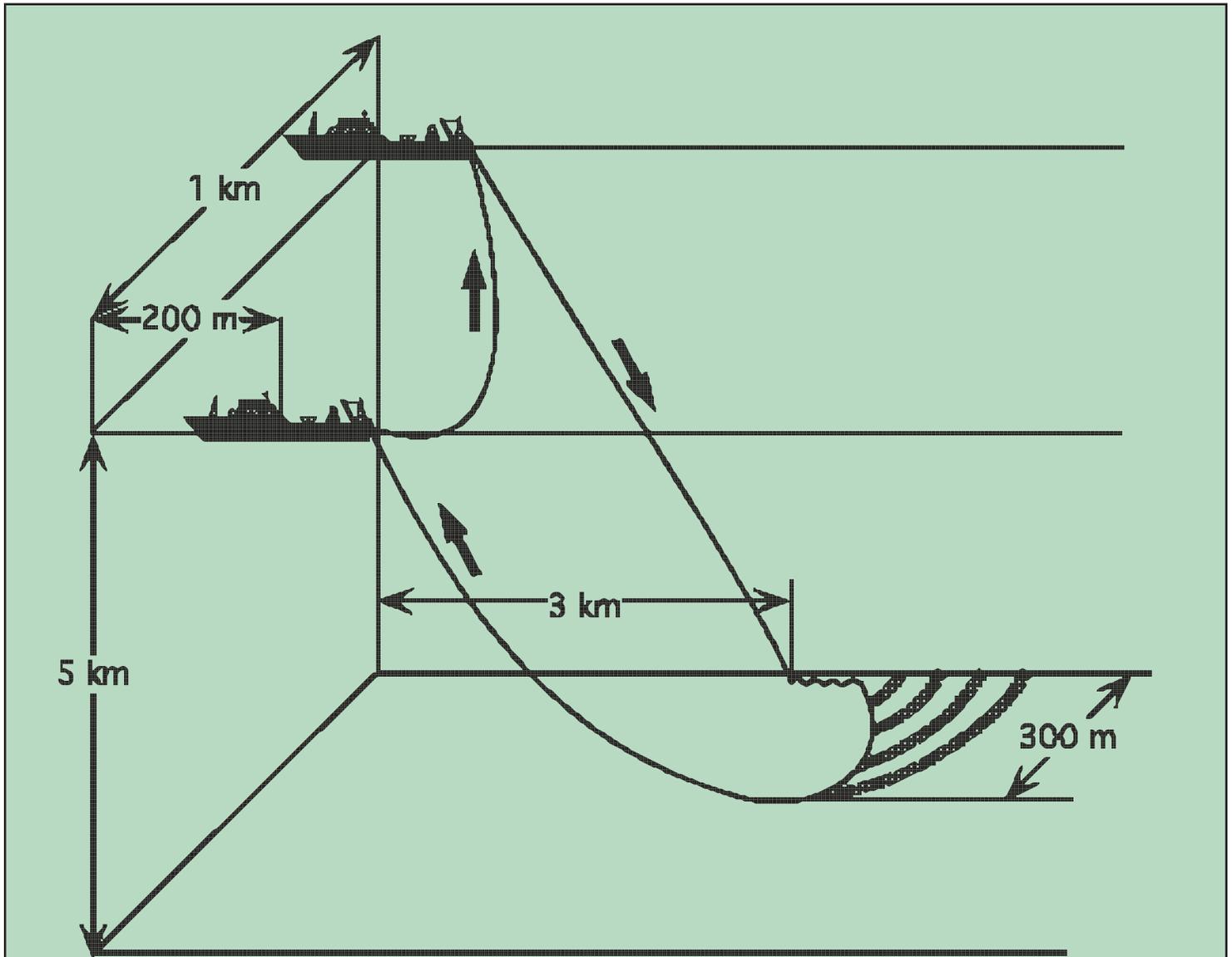
## 采矿技术

采矿和加工技术在很大程度上会决定哪些地区适合开发结核。结核达到一定丰度，采矿设备才能高效作业。另外，结核须具备一定品位（有用金属在矿石中所占比例），才能经济合算地通过冶金流程提取有价值的商品。

1970年，在佛罗里达州岸外水深1 000米的大西洋布莱克高地进行了第一次结核采矿原型系统试验。“深海探险”公司在6 750公吨的货轮“深海采矿者”号上装置了一个高25米的吊杆和一个6米乘

9米的中央池（采矿装置即由此部署）。结核用曾在250米矿井试验的气举系统提升。

1972年，30家公司组成的集团试验了日本海运官员Yoshio Masuda发明的系统。连续链斗系统系在一条八公里长的回转链上每隔一定距离挂一个戽斗。戽斗从前捕鲸船“白岭丸”的船首投放，在船尾回收。采集到了一些结核，不过链索缠在一起，试验遂告终止。1975年计划进行新的试验，不用一艘船而用两艘船，终因缺少经费而取消。



用两条船作业的  
连续戽斗开采系统

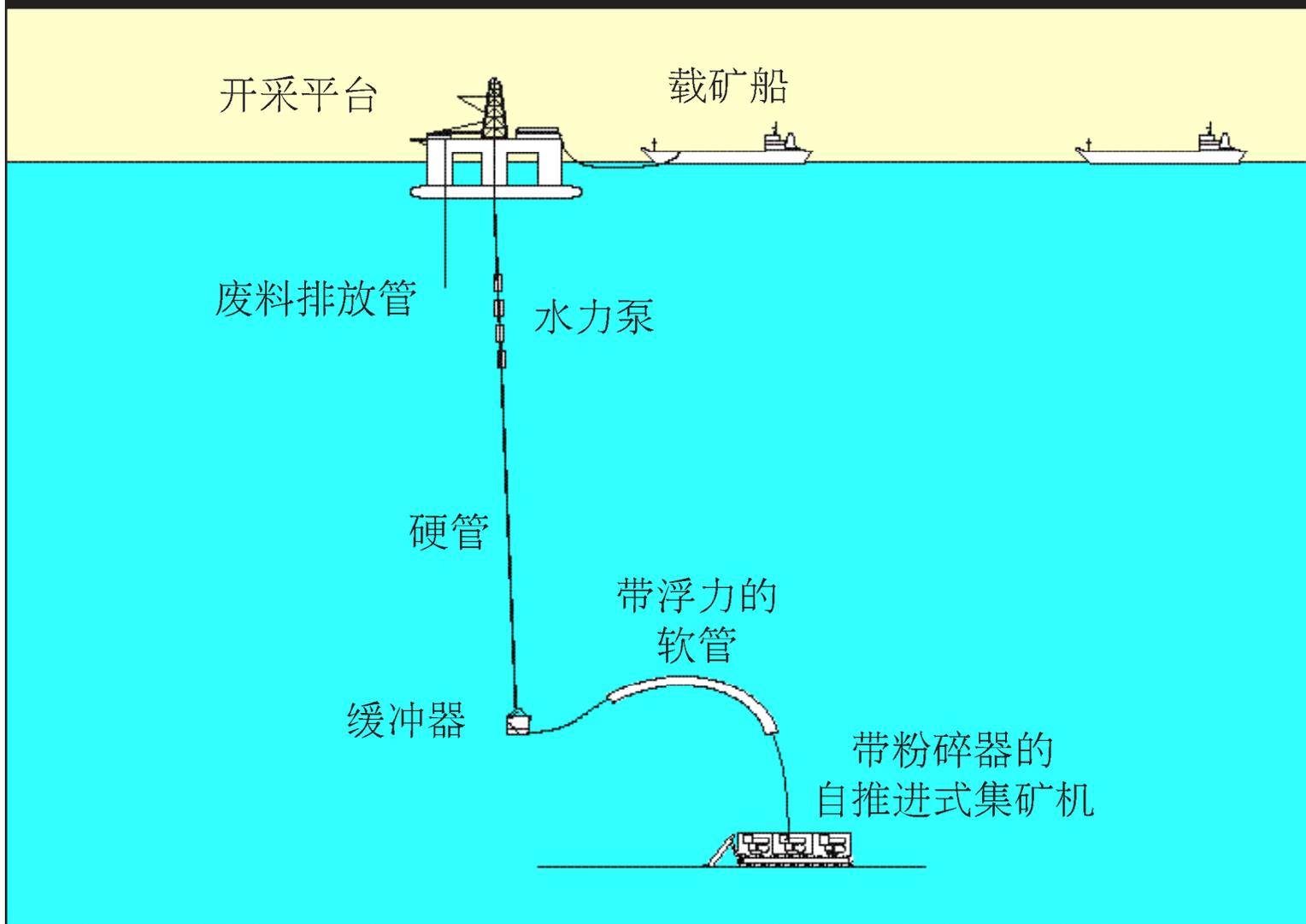
1970年代末，三大美国财团在太平洋水力采矿系统进行采矿试验。海底结核由一挖掘装置采集，传送到悬在海面船只下方的提升管的底部。海洋管理公司（OMI）使用动力定位的钻探船“SEDCO 445”号。船上装有吊杆，以常平架支撑，以减少船体运动对提升管的影响。试验的两种升举系统为：用装在提升管内水深1 000米处的离心轴流泵吸送；在水深1 500米和2 500米之间注入压缩空气进行提升（气举）。提升管后边拖着两个采集装置：一个带喷水器的水力吸入式挖采装置和一个配备反向传送带的机械采集器。第一个采集装置不幸因操作失误丢失。不过，在夏威夷以南1 250公里处进行的三次实验共采集到约600公吨结核。

1976年，海洋采矿协会（OMA）在20 000公吨运矿船“Wesser Ore”号上装备了月池（船体开口，供钻探设备通过）、吊杆和旋转式推进器。结核由水橇拖曳的挖采器吸入采集，以气举装置提升。该船后更名为“深海采矿者二”号，1977年在加利福尼亚州圣迭戈市西南1 900公里处进行了第一批试验。由于管柱的电接头并

非绝对防水，试验遂告暂停。1978年初，另外两轮试验再度受挫，首先是挖采装置陷入海底沉积物中，后又遇上飓风。最后，1978年10月，在18小时内提升了550公吨结核，最大能力为每小时50公吨。由于吸入泵一个叶片折断，电动机停转，试验遂告终止。

1978年，海洋矿产公司（OMCO）向美国海军租用了“格洛玛探索者”（Glomar Explorer）号。这一动力定位船排水量33 000公吨，长180米，利用精密系统部署管柱和电缆。船上的大月池（61 x 22米）有利于大采集器作业。该公司建造了配备阿基米德螺旋的电动采集器，可在松软的沉积物上爬行。先在加利福尼亚岸外水深1 800米处做了好几次试验，后于1978年底在夏威夷以南进行第一批试验，但因月池门打不开而告暂停。1979年2月，此项作业终于得以顺利进行。此外，该船的先进电脑系统还搜集了许多数据。这些作业成功地说明：挖采和提升的基本做法是正确的。

## 水力开采系统



1979年，法国工程师考虑到海洋底部地形障碍（如断块、阶地、悬崖和凹陷等）带来的困难，终于决定海底采集器需有更大的活动余地。他们提出自由穿梭采矿系统的概念；该系统由一系列能自行潜入海底的独立采集器组成。到达海底之后，采集器会排出压载物，妥善安身，然后开始采集结核。采集器由铅电池驱动，利用履带爬行，并通过排放压载物调整其高度；在装载250公吨结核后将进一步排放压载物，开始浮上水面；到达水面后，被拖至浮动港。遗憾的是，在可行性研究期间发现，该系统过于昂贵，因为穿梭器重1 200公吨，远远高出其250公吨的装载能力。问题在于现有浮力材料性能差和（或）铅电池重量/能量比高。

水力系统现在似乎潜力最大。1988年法国 GEMONOD（开发结核采矿必要手段集团）提出此系统的概念。系统包括：半潜式双体船水面平台长4 800米的刚性钢管柱；和长 600米，内径 38厘米的软管，把管柱底部和海底挖采装置连接在一起。软管成弧状，使挖采装置可以为避开障碍物而偏离海面平台的航迹。自行式挖采装置长 18米，宽 15米，高 5米，重 330公吨，浮力 78公吨。装置在海底爬行时采集结核并予以处理，以便通过软管输送。

运矿船将结核从采矿船运至港口的加工厂。结核将作为稠泥浆经由软管输入、输出装载船舱。在加工场所，泥浆存储蓄池。

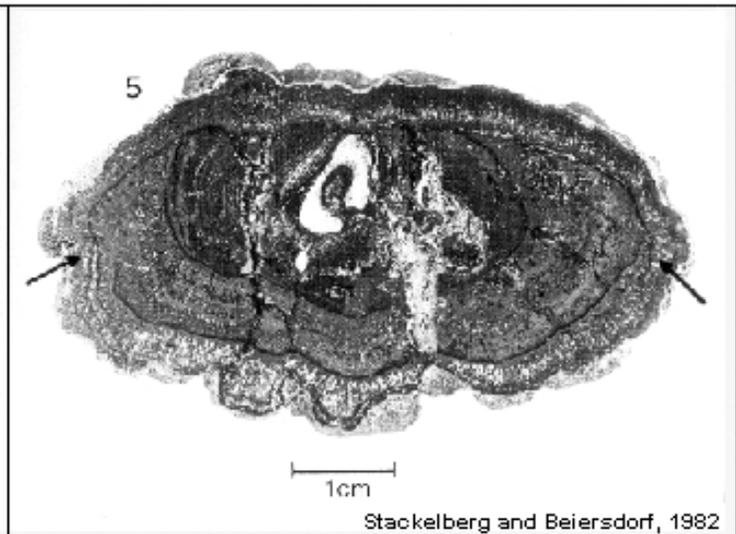
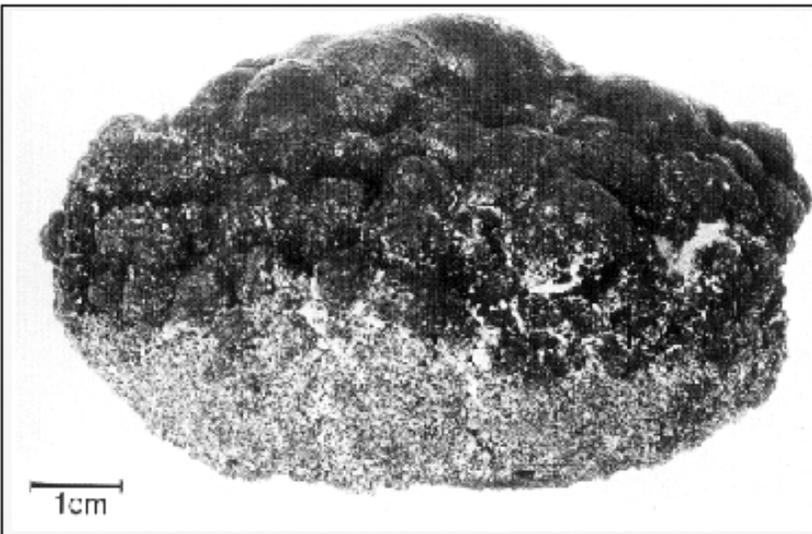
印度目前正在研制一种采矿车，打算在 2007-08年试验。国家海洋技术研究所主任在 2001年国际海底管理局所举办的讨论会上指出，该研究所已在 410米水深处试验原型，计划于 2002年在 6 000米水深处进一步试验。该装置3米宽，以塑料轨道在海底爬行。前置的捡拾机采集结核，由传送带将其送入轧碎机。按照设计，系统会有振动动能，避免淤泥进入轧碎机。轧碎结核经由直径10厘米的软管以提升泵输送至水面船只。另一脐带连接为供电缆和通讯电缆。爬行器虽然以系缆与水面船只联系，但在海底可以独立活动。开发人员称，该系统比先前的更注重环境问题。



多金属结核现场



科学家从多管取样器中取出沉积物样品 (Christina Loarie)



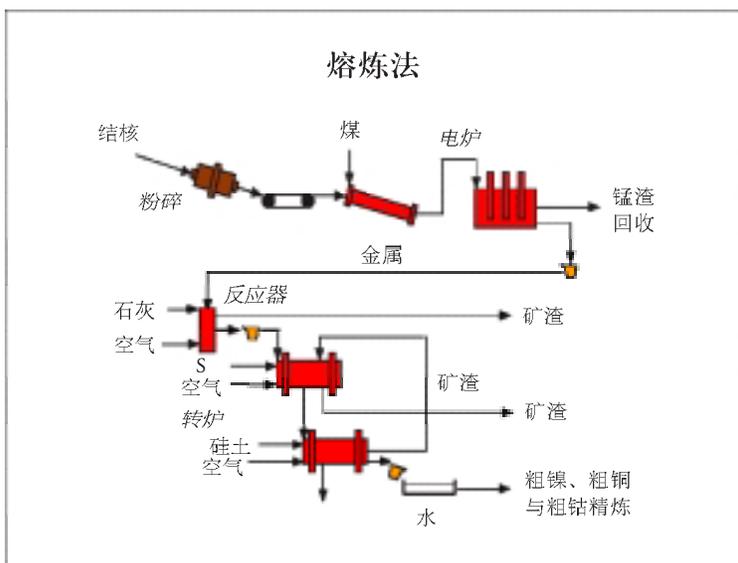
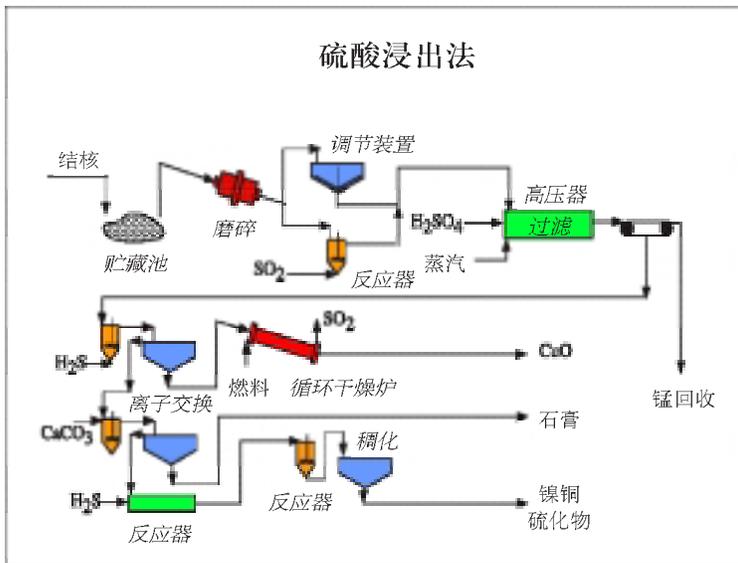
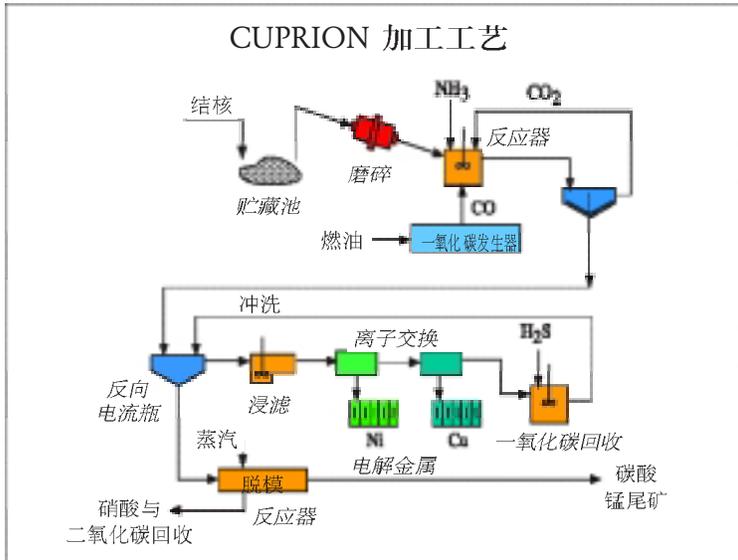
多金属结核及其切面

Stackelberg and Beiersdorf, 1982

# 加工技术

为处理多金属结核已开发研究了不少工艺流程。起初，只考虑提取镍、铜、钴这三种金属。1978年后，也考虑提取锰，以提高总收入、减少浪费。技术分两类：湿法冶金法——用酸性（盐酸或

硫酸）或碱性（氨）试剂把金属从结核中浸出；熔炼法——将氢氧化物还原（去氧），以重力分离金属熔液。下面试举三例。



## Cuprion氨浸出法

Cuprion氨浸出法是肯尼科特（Kennecott）公司开发的。结核被磨碎成浆，在搅拌桶内以一氧化碳加氨低温还原。经一系列加稠器进行逆流浸析后，铜、镍、钴处于可溶状态。然后再通过液体离子交换剂以电解冶金法（以电解作用分离）萃取镍和铜；钴以硫化沉淀法除去。不过，从铁锰渣回收锰有一定难度。

## 硫酸浸出法

这一流程是菲尔斯特瑙于1973年提出的，其后法国原子能委员会通过研究，对之作重大改进。轧碎结核所含金属在摄氏180度高温和1200千帕高压下以硫酸溶解。用硫化气预先还原一些结核，将得出的二价锰离子注入压热器（蒸汽压力加热器），以提高钴回收量。以硫化氢沉淀所余溶液中的铜、镍和钴。硫化铜经焙烧成为氧化铜精矿，镍钴精矿则以硫化矿形式保存。

在提炼厂，氧化铜精矿以硫酸浸析，再用电解冶金法萃取金属。硫化镍钴精矿在氨和水中溶解。在去除铁和锌之后，剩余的两种金属由离子交换溶剂分离。钴以氯化物的形态产出送至炼钴厂；镍电解萃取。铁锰渣在电炉内烘干煅烧后进行熔炼，磷和部分铁在此过程中被去除。

## 熔炼法

好几家公司研究了应用传统镍和铜熔炼法来处理多金属结核的问题。结核在旋转窑中烘干和煅烧，然后送入埋弧电炉还原，产出富锰炉渣和铁镍铜钴合金。合金经过转炉精炼，氧化作用排除大部分剩余的锰和铁。加硫后产出镍铜钴锭。

镍铜钴锭可用镍矿业所用的几种方式处理。例如，可在磨碎后以氯选择浸出。从铜溶液中除去硫后，以离子交换和电解法提取镍。在以离子交换法萃取钴和镍之前，先除去镍钴溶液中的铁和锌。

富锰炉渣趁热直接送进电弧炉，在除去磷和剩余重金属（镍、铜、钴）及大部分铁后，产出硅锰铁合金。