深海多金属结核物理特性及其对采输 过程的影响概述

王华昆1,高婧1,余杨2,孙震洲3,李修波4

(1.建筑与土木工程学院(厦门大学) 厦门 361005;2.水利工程仿真与安全国家重点实验室(天津大学) 天津 300072;
 3. 华东勘测设计研究院有限公司 杭州 311122;4.中车 SMD(上海)有限公司 上海 201360)

摘要:文章旨在确定深海多金属结核的物理特性,并分析其对采输过程的影响,以指导工程应用。 总结了深海多金属结核开采的最新研究进展,通过对数据进行统计整理、回归分析,确定了结核形 成机理及主要成分、在海底的分布特性、结核形态及构造、结核尺寸与重量关系、含水量、密度、孔 隙特性及结核强度等关键物理特性。研究表明:结核形状多样,质松多孔隙,含水率高,近似均匀 分布在海床上或浅泥层中。颗粒质量和尺寸联合概率分布具有长右尾特性,需使用更广义的联合 概率密度函数 copula 才能准确建模。结核抗拉强度随结核直径增大按对数函数递减。此外,深海 高压环境下结核的开采需更多能耗,且结核表现出更高的延性。结合固液两相流分析和颗粒沉降 理论,分析了结核形状、尺寸、密度等主要参数对水力举升过程的影响,确定了颗粒破碎的主要方 式和规律,总结了不同粒径级配输运造成堵塞的可能原因。 关键词:多金属结核;形态;密度;孔隙;强度;水力举升;碎裂

中图分类号:TD50; P7 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-9857(2023)03-0053-12

Overview of Physical Characteristics of Deep-sea Polymetallic Nodules and the Effects on Mining and Transportation Processes

WANG Huakun¹, GAO Jing¹, YU Yang², SUN Zhenzhou³, LI Xiubo⁴

(1. College of Architecture and Civil Engineering (Xiamen University), Xiamen 361005, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety(Tianjin University), Tianjin 300072, China; 3. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 4. CRRC SMD (SHANGHAI) LTD, Shanghai 201360, China)

Abstract: This study aimed at determining the physical characteristics of deep-sea polymetallic nodules and analyzing their influence on the mining and transportation process, so as to guide engineering applications. This work summarized the latest progress of deep-sea mining of polymetallic nodules, through the statistics and regression analysis of available data, the formation mechanism of polymetallic nodules and the main composition, the distribution characteristics on

通信作者:高婧,硕士生导师、教授,博士,研究方向为工程结构设计

收稿日期:2022-06-03;修订日期:2023-02-17

基金项目:福建省自然科学基金"深海采矿水力输运粗颗粒冲击破碎机理及其诱导冲蚀损伤研究"(2021J01212762).

作者简介:王华昆,助理教授,博士,研究方向为深海采矿,海洋结构完整性评估及多场耦合仿真

海洋开发与管理

the sea floor, the morphology and structure, the relationship between size and weight, water content, density, pore characteristics, the strength and other key physical properties were determined. The study indicated that the polymetallic nodules were of various shapes, and it was loose and porous, the water content was high, and they were approximately uniformly distributed on the seabed or in shallow mud. The joint probability distribution of particle mass and size had a long right tail, more generalized joint probability density function of copula should be used in accurately modeling. Besides, the tensile strength of nodule decreased logarithmically with the increase of nodule diameter. In addition, the mining of nodules in deep-sea high-pressure environment required more energy consumption, and the nodules exhibited higher ductility. Combined with the theory of solid-liquid two-phase flow analysis and particle settlement theory, the influence of main parameters such as shape, size and density of nodules on the hydraulic lifting process was analyzed, the main way and law of particle fragmentation were determined, and the possible causes of blockage caused by transportation with different particle sizes were summarized.

Keywords: Polymetallic nodules, Morphology, Density, Porosity, Strength, Hydraulic lifting, Fragmentation

0 引言

海洋学家从 19 世纪末就知道世界各大洋地区 都有大量富含矿物质的多金属结核(也称锰结核), 但真正勘探和深海矿产开发是从 1970 年开始的,这 与人们越来越意识到这些矿藏的战略重要性以及 深水技术的进步有关^[1]。研究表明^[2]:全球大洋底 部多金属结核总量约 2 万亿~3 万亿 t,太平洋约有 1.7 万亿 t,其中约有 540 亿 t 干结核含 6.5 亿 t Ni、 5.2 亿 t Cu、1.15 亿 t Co 和 100 亿 t Mn,这些矿产 资源将成为未来能源需求的目标^[3]。

多年勘探表明太平洋的克拉里昂一克利珀顿 区(Clarion Clipperton Zone, CCZ)是结核资源最丰 富的区域, CCZ 沉积物位于热带太平洋东北部水深 3 700~5 500 m 的表层沉积物上,面积约 450万km^{2[4-5]}。结核矿床的主要特征之一是它们 是二维的,这对采矿车开采非常有利,因为结核可 以从海床表面或浅泥区收集, 然后进行冲洗, 碾碎 后运到海面采矿船上。实践表明:水力输运是当前 最具商用前景的深海采矿方式(图 1^[6]),该系统从 6 000 m海底挖掘多金属结核需要开挖结核的海底 采矿工具(Seafloor Mining Tool, SMT)、通过连接 挖掘工具和垂直水力运输系统(Vertical Transport System,VTS)的跨接软管运输结核泥浆,然后通过 立管输运结核。矿浆液通过输送系统后,首先进入 SMT离心泵,此时矿物颗粒破碎主要与法线方向的 强力冲击有关,随后矿浆液进入柔性软管(flexible hose)。柔性软管缓波形结构会导致浆体分层,在倾 斜和水平部分形成结核和沉积物的滑移床(sliding bed),且滑移床的上方会形成剪切层(shear layer)^[7-8]。通过软管后的矿物颗粒进入中继站,可在 中继站短暂储存,随后通过多级泵送至水面支持船。



Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic lifting system

多金属结核本身的物理性质对海底采矿车开 采、破碎过程以及结核在水力举升系统中的输运过 程具有重要的影响。本研究基于最新研究成果,总 结了多金属结核的主要物理特性,包括:主要成分、 形貌、尺寸、密度、强度等,分析了结核物理特性对 开采和输运过程的影响,以指导工程实践。

1 主要物理特性

多金属结核的物理、力学和工艺特性的描述一 直是国际海洋金属联合组织(International Joint Organization of Marine Metals,IOM)"多金属结核 勘探工作计划"岩土学研究的重要组成部分,该项 目在 1997 年就被国际海底管理局立项^[4]。在 2001—2016 年的 4 次海上考察中,IOM 获得了与 多金属结核岩土性质相关的大量数据,分别为 IOM -2001、IOM-2004、IOM-2009、IOM-2014。其 中 IOM 勘探面积高达7.5 万km²,分别于 2001 年和 2004 年进行勘探,当时最有希望的标记区域为 "2009"号和"2014"号勘探区块 H11 和 H22^[4]。

1.1 结核形成机理及主要成分

多金属结核的形成至少须具备以下几个条件^[9]:①具有赖以生长的核心物质,核心物质可能是 老的结核片(铁锰质),也可能是火山岩、沸石、磷灰 石、蒙脱石、蚀变玄武岩、鱼骨、鱼的牙齿、铁锰矿物 及黏土等^[2];②具有一定的稀有金属物质来源,核心 物质周围金属的富集主要通过从海水中沉淀金属 及从底层沉积物之间的间隙释放金属,或者是通过 早期成岩过程,也可能是两者的结合^[10];③具有一 定的构造机理;④适宜的地球化学环境。

根据东太平洋海盆 CC 区多金属结核的生长历 史,结核按形成的底质环境划分为 2 种类型^[11]:一 类是与间断面有关的结核;另一类是与固结的火山 灰层有关的结核。而 Dreiseitl^[4]根据结核形成方式 将结核分为 3 种类型:水成 H 型(Hydrogenetic, H)、成岩 D 型(Diagenetic, D)和过渡型,即水成成 岩 HD 型(Hydrogenetic-Diagenetic, HD)。多金属 结核形成过程中矿物沉积速率很慢,测量沉积速率 的方法有很多,如¹⁰Be 测年法、U 系年代学方法、铀 系放射性测年法、Sr 同位素地层学法、经验公式法、 基岩年龄推算、生物地层学法^[12]、Os 同位素地层学 法^[12-13]等。上述方法在时限上或准确度上均存在 一定的局限性,其中放射性年代学和生物地层学法 是最为常见的方法,铀系年代学只能用于测定富钴 结壳和多金属结核表层约 2 mm 的年龄^[12],Os 同 位素地层学法具有灵敏度高、不易受外界干扰等优 势,可以准确定年的时间尺度到达 65 Ma^[14]。基于 上述方法,研究人员给出了典型的结核生长速率, 典型值如表 1 所示^[12-13]。

表1 不同矿物的生长速率

Table 1 The growth rates of different minerals

		mm/ Ivia
样品名称		生长速率
富钴结壳	CAD10	2.21 ± 0.14
	CBD12-2	2.25 ± 0.17
	CAD25-1	2.01 ± 0.07
	MR 12-03-D06-R01	1.8
	MC 10-CB07-B	1.4~3.0
多金属结核	40V-C1-BC1601	1.16 ± 0.07
	40VI-C1-BC1612a	1.31 ± 0.07

深海海底多金属(锰、锰铁)结核是锰铁氢氧化 物和黏土矿物的天然多矿物聚集体,其化学组成中 含有 50 多种元素^[2,15],主要是由锰的氧化物和氢氧 化物[水羟锰矿(δ-MnO₂)和钙锰矿(钡镁锰矿)] 以及铁组成,次要组成部分包括钙十字沸石、蒙脱 石、水云母、石英、金红石、磷灰石等^[2]。矿物内含有 微量金属,如镍、铜、Co和稀土元素^[12,16]。研究表 明:Mn的含量在 16%~19%,Fe 的含量在 15%~ 17%^[12],且一般情况下多金属结核中的 Mn、Fe 元 素占全部元素含量的 47%以上^[2]。此外,研究表明 Mn 与 Fe 元素含量呈负相关,与 Co、Ni、Mg、Pb、 As、Se 呈正相关; 而 Cu、Al、Ba、Ag、Sn、Sb 元素与 Fe 含量呈正相关^[12]。

1.2 在海底的分布特性

多金属结核广泛分布于大洋海底沉积物表面, 结核呈数厘米至数十厘米的颗粒状,结核以二维沉 积形式大量存在于松散的沉积物一水界面,有时埋 藏在不同深度的沉积物中,一般结核发生在沉积速 率极低的地区,近似随机地覆盖在海底表面^[9](图 2^[17]),绝大多数赋存于深 3.5~6.1 km 的洋底表面 或深 1 m 的海泥内^[1],当水深小于 4.5 km 时,结核 的丰度明显降低^[2]。矿床的性质在世界各地差别很 大,甚至在同一矿床相对较小的区域内也有巨大差 异^[1]。李国胜^[2]研究表明:CC 区结核覆盖率平均 值高达 48.9%,以 10%~30%和 80%~100%为 主, 目 80%~100%占较大比例。结核分布区的海 泥主要成分为蒙脱石、伊利石、绿泥石及高岭石,其 余为硅质软泥和钙质软泥,洋泥大部分粒径小于 0.01 mm。洋泥中含水率高达 180%~300%,压缩 系数 1.8~2.5,在承载由 10 kPa 增大至 100 kPa 时, 空穴率由6降至1,海泥表面剪切强度为0.5~ 1 kPa,越深处强度越高,30 cm 深时剪切强度 5~ 6 kPa,并趋于稳定^[16],松软的洋泥给采矿车的行走 技术带来了巨大挑战。此外,结核富存区水深大, 温度低(约为1℃~4℃),洋底界面处海水的盐度约 为 3.5%, 密度为 1 025~1 050 kg/m³, 海流速度 10 ~30 cm/s^[16],高压低温也对采矿车的长期运行可 靠性形成了巨大挑战。



图 2 CCZ 中的锰矿和结核分布及断面构造[17] Fig. 2 Distribution and sectional structure of manganese ore and nodules in CCZ

1.3 结核形态及构造

结核呈黑色,外观各异,大多为球粒状(马铃薯 状)、椭球状、菜花状、扁平状及各种连生体^[1,12,16] (图 3)。这些结核曾被描述为土豆状、炮弹状、弹 状、片状以及其他一些不太容易辨认的形式^[17]。根 据 Dreiseitl^[4]的研究,常见的结核形态为椭球状结 核的碎片 fE(70 个样本),未破碎的结核形态为 瓶球状(51 个样本)和 D 盘状(13 个样本)(表 2)。 表 2 中省略了球状或扁平状等数量少于 10 个的数 据^[18]。常见的形态(结核类型)有:D(Discoidal) — 盘状、E(Ellipsoidal) — 椭球状、S(Spheroidal) — 球 状、T(Tabular) — 板状、P(Polynuclear, Accreted) 一多核,累积、I(Irregular)一不规则、fD(Fragments of Discoidal)一圆盘破碎、f(Non Identified Fragment)一未识别碎片^[4]。由于结核的形成过程特 点,其结构并非均匀的,其剖面具有典型的"年轮" 特性,如图 2 右图所示,这种特性对其输运过程中 的碎裂具有重要影响。此外,研究表明各种形态类 型的结核产出与地形有密切关系^[2]。

表 2 根据形态分类的结核物理性质(186个样品)[4]

 Table 2 Physical properties of nodules classified

by morphology (186 samples)

形态	w/%	ho/ (g • cm ⁻³)	n/%	$ ho_s/$ (g • cm ⁻³)	$w_n/\%$
椭球状结核的 碎片 fE	47	1.99	62	3.53	32
未识别碎片f	46	1.99	61	3.49	32
椭球状 E	49	1.94	62	3.46	37
盘状 D	50	1.93	63	2.45	27



(a) 俯视图

(b) 底视图



图 3 深海多金属结核^[4] Fig. 3 Deep-sea polymetallic nodules

1.4 尺寸及重量

多金属结核尺寸绝大部分在 30~70 mm 之间 (也有大于 100 mm、小于数毫米的),个别大于 1 m 的^[16],常见结核的最大尺寸约为 50 mm,平均尺寸 约为 30 mm^[19]。Dreiseitl^[4]观察发现存在 6 种大小 的结核为:0~2 cm、2~4 cm (小)、4~6 cm、6~ 8 cm (中)、8~10 cm 和超过 10 cm(大)。Morgan 等^[20]对美国调查区内 5 358 个无缆取样器样品进行 了粒径分析,得到的粒径大致分布规律如式(1)所 示^[9]。结核颗粒尺寸会影响输运过程中结核与泵叶 之间的相互作用力,研究表明:在结核与泵叶等结 构撞击过程中,撞击力峰值与颗粒质量成正比(与 粒径三次方成正比, $F \propto m \propto d^{3}$),与颗粒动量成正 比($F \propto mv$)^[5]。

$$\ln N = Y_0 - \frac{B}{2G}D\tag{1}$$

式中:N 为粒级为D 的结核个数; Y_0 为截距;B 为 结核埋藏速率;G 为结核生长速度。

Kim 等^[21] 详细研究了锰结核大小和质量的概 率分布。采用联合概率分布作为统计模型来考虑 结核大小和质量两种物理性质之间的相关性,研究 使用的 47 个站点共 175 个数据集,如图 4 所示^[21]。 统计建模中不包括来自最后一个尺寸区间 (>10 cm)的4个质量大于400g的数据集,因为采 矿车的目标锰结核轻于 400 g^[22]。锰结核的平均粒 径和质量的 Pearson 相关系数为 0.840 9,表明两者 之间具有中等强的相关性。因此,为了获得锰结核 大小和质量的统计模型,必须采用考虑两种物理性 质之间相关性的多元统计模型。Kim 等[21] 研究表 明:大多数锰结核的尺寸都小于7 cm,随着尺寸的 增大,数据出现的频率明显降低。由此可以推断锰 结核的平均粒径分布为左偏分布(Left-Skewed Distribution)。图 4 中质量数据的直方图显示出比平 均大小的偏度更大。总的来说,70%的锰结核的质 量低于 50 g,因此,质量的分布有一个很长的右尾。 由于锰结核的大小和质量是强烈相关的,它们的统 计建模不能只单独处理这两种属性。图 4 锰结核 的数据表明,由于大体积、大质量对应的数据稀疏, 联合概率分布应具有长右尾。因此,正态分布的假 设不符合锰结核的平均大小和质量,所以多元正态 分布不能描述该分布特征,多元正态分布的这些局 限性可以通过使用更广义的建模联合概率密度函 数 copula 进行克服^[21]。

1.5 结核水含量、密度及孔隙特性

结核质松多孔隙,含水率高,经脱水后,仍含有 30%~40%的游离水和10%~15%的化学结合水, 比重2.2~2.4, Mohs 硬度1~4,平均硬度3.0^[16]。



图 4 KR5 区的 175 个锰结核尺寸和质量样本数据的 直方图及散点图

Fig. 4 Histogram and scatter plot of size and mass data of 175 manganese nodules in KR5 area

水含量 w(%)是结核中所含的水量,表示为单位质 量干燥结核在 105℃下蒸发的水的质量。在蒸发过 程中,含孔隙水的盐类在结核孔中析出,结果需要 考虑海水矿化(M=0.035)的影响^[4]:

$$w = \frac{w_0 (1+M)}{1 - M \times w_0 \times 0.01}$$
(2)

式中:w₀为不考虑 M 的含水量, M=0.035 表示孔 隙海水矿化。天然含水量 w_n(%)表示为在 105℃ 下蒸发的水的质量相对于湿结核样品的质量。"天 然含水量"的测定对于干燥条件下结核储量的估算 极为重要。根据 Dreiseitl^[18]的研究(表 3),在自然 状态下,1/3 的结核重量是孔隙海水。

表 3 H11 勘探区块 173 个结核物理性质分析^[4] Table 3 Physical properties of 173 nodules in H11

exploration block

结核物理参 数统计值	w/ %	ρ/ (g•cm ⁻³)	ρd/ (g•cm ⁻³)	n / %	е	ρs/ (g•cm ⁻³)	wn / %
均值	46	1.97	1.35	61	1.57	3.46	32
中位数	46	1.98	1.36	61	1.58	3.52	32
最大值	57	2.06	1.51	66	1.96	3.68	37
最小值	36	1.83	1.18	53	1.14	2.98	27
平均偏差	3.48	0.04	0.06	2.21	0.14	0.13	1.65

体积密度(潮湿单位重量)ρ 是包括空气和水在 内的结核重量与其体积的比值^[23],而干结核密度 (干单位重量)ρ_d 是指不含水的结核重量与总结核 体积的比值,可用下式表示[4]:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w \times 0.01} \tag{3}$$

式中: ρ 为体积密度;w 为孔隙海水矿化,M = 0.035校正后的含水量。Neizvestnov^[24]提出了一种考虑 孔隙海水密度(值为 1.025 g/cm³)的流体静力称重 方法。研究表明体积密度与含水量之间存在明显 的关系,大多数耦合数据点位于趋势线周围(图 5)。 化学分析也证实约 95%的结核样品具有成岩成因 (Diagenetic Origin)。实验结果表明,体积密度 ρ 在 1.90~2.05 g/cm³之间变化,含水量在 40%~55% 之间变化。





研究表明:在包括结核在内的深海海床沉积物中,孔隙海水填满了固体颗粒之间的空隙。空隙的数量可以用孔隙率(Porosity)和空隙率(Void Ratio)来表示。孔隙率n(%)表示空隙(孔洞)占结核质量总体积的比例^[4],而空隙率e(无单位)表示空隙体积与固体体积的关系^[25],孔隙率可表示如下:

$$n = \frac{w \times \rho_d}{\rho_w} \tag{4}$$

式中: ρ_w 为温度 $t = 20 \mathbb{C}$ 时M = 0.035的孔隙海水密度($\rho_w = 1.025 \text{ g/cm}^3$),孔隙率和空隙率之间的关系可用式(5)表示。表 3 总结了H11勘探区样站结核的物理性质,给出了上述物理参数的典型值。

$$e = \frac{n}{(100 - n)} \tag{5}$$

1.6 结核强度

结核强度对开采和输运过程均有较大影响,量

化结核强度对优化矿物采集头、功率确定,优化输 运参数(如流速、泵转速、管径等)具有重要意义。 Dreiseitl^[4]对 CCZ 结核(共检测 256 个结核)的单轴 抗压强度(UCS)进行分析,结核粒径范围为0<d< 100 mm,测试结果表明结核强度随结核大小的增加 而减小,但 Dreiseitl^[4]没有详细描述相关的失效机 制或测试方法。随后 Zenhorst^[26]使用 Zwick-Roell Z100 压缩试验机对粒径范围 11 < d < 30 mm 的 CCZ 结核进行慢压缩测试时也发现了相似的趋势, 该测试设备带有 100 kN 的测压元件,压缩速率为 25 mm/min。然而,Zenhorst^[26]报告的结核强度明 显小于 Dreiseitl^[4] 的测试结果。在 Zenhorst^[26] 的 实验中,结核在大气压力下完全被水饱和,没有出 现明显的裂纹,结核只是破碎了。最近, Van wijk 等^[5]进一步对粒径 16 < d < 90 mm、平均湿密度 ρ_s $=1.677 \text{ kg/m}^{3}$ (干密度 $\rho_{d} = 1.127 \text{ kg/m}^{3}$)的饱和 水 CCZ 结核进行了附加试验,验证了结核强度的数 量级和压缩破坏机理。慢速压缩测试是在装有 0~ 50 kN 传感器的 Toni Technik 1544 测试台上进行 的。检测的结核包括 16 $< d \leq 22.4$ mm 级的 4个, 22.4 < d ≤ 31 mm 级的 10 个, 31 < d ≤ 45 级的结核 7个,45<d≤70 mm 级的结核 11个,70 <d< 80 mm和 d >80 mm 级结核各 1 个。由于在 UCS 测试中,试样因拉应力而失效,Van wijk 等^[5]根据 拉应力比较数据,采用 Hiramatsu^[27]的关系来表示 拉应力 σ_i 与压缩力 F_i 和结核直径 d 的关系(假设结 核为球形):

$$\sigma_t = 0.7 \, \frac{4F_c}{\pi d^2} \tag{6}$$

Van wijk 等^[5]的 UCS 测试结果与 Dreiseitl^[4] 和 Zenhorst^[26]数据汇总如图 6 所示,图中也给出了 3 组不同试验以及 Van wijk 等^[5]和 Zenhorst^[26]数 据集中结核强度与结核尺寸的函数关系,计算结果 表明结核强度可用结核尺寸的对数函数表示。Van wijk^[5]的试验数据与 Zenhorst^[26]的结果基本一致, 但远小于 Dreiseitl^[4]的结果,一种解释可能是结核 的不同地理来源,尽管样本都来自 CCZ,但波兰许 可区(Dreiseitl 使用的结核)和比利时许可区(Van wijk 等^[5]使用的样本)距离较远,可能会导致不同 的结核成分,因为即使在同一个矿区也曾发现结核 成分存在显著差异^[1]。Van wijk 等^[5]给出了每个 尺寸等级的数据的平均值以及结果的范围(min, max)。计算数据的标准差(SD)为:4个粒径属于 16<d<22.4 mm的结核 SD=0.73 N/mm²,粒径在 22.4 < d < 31mm的 10个结核 SD=0.25 N/mm², 粒径在 $31 \le d \le 45$ m的7个结核 SD=0.10 N/mm², 粒径在 45 < d < 70 mm 的 11 个结核 SD = 0.045 N/mm^2 ,由此可见结核尺寸越大,拉应力 σ_i 离 散性越小。





物理特性对开采过程的影响 2

结核形状、尺寸及强度对采集头的设计尤为 重要,明确典型的结核尺寸才能选择合理的采集 头和管道内径,选择合理的流速,避免堵塞。此 外,由于深海采矿车电力输送十分有限,因此需对 破碎荷载进行优化设计,以节省电力能源,这就要 求对结核本身的强度、硬度特性有更准确的认识, 从而为破碎头选择合理的材料,为采集头的定期 更换提供指导。

在岩石开挖过程中,最重要的一个方面是设计 一种刀具,使其能够适应岩石的抗压和抗拉强度等 特性,并能适应给定矿区的地质和环境条件。设计 挖掘工具的一个重要步骤是确定所需的切削力和 功耗,深海采矿作业所需的电力量可能比浅海采矿 作业要高。荷兰 MTI 在 2006 年就指出了这种潜在 问题[28],在此基础上广泛的研发计划的制定和启动 都是关于研究深水(约2000m)岩石切削过程的基 本机制,并开发一种方法用于设计挖掘工具。研究 结果表明,一般来说,在高压下岩石表现出更强的 延性,使得裂纹的产生和扩展变得更加困难,导致 更高的切削力和更高的功耗。图 7^[28] 为裂纹模式的 数值模拟结果和巴西抗拉强度断裂实验室结果[29], 该图证实了采用离散元(DEM)法创建的岩石试件 可以很好地捕捉断裂机制。图 8 分别为浅水深度 和深水深度 DEM 模拟结果^[28],从图中可以看出,在 浅水深度,切削机构主要是脆性的,产生的裂纹主 要为拉伸裂纹:在深水时岩石切割过程以延性为 主,产生的裂纹主要为剪切裂纹。



图 7 由巴西试验得到的裂纹模式[28]







图 8 岩石切削机理 Fig. 8 Rock cutting mechanism

显然,开采过程中会产生岩石碎屑,高压岩屑对 垂直运移过程的重要意义在于岩屑的流体力学行为。 这种行为的影响存在于不同的水平上:在粒子水平 上,单个粒子的传输速度强烈依赖于粒子的形状。在 宏观层面上,粒子可能会形成高度集中的区域(团簇、 堵塞),粒子的形状决定了这些结构的性质。

物理特性对水力输运过程的影响 3 颗粒的形状、密度和强度会显著影响颗粒的水 力输运过程。其中颗粒形状主要影响作用在颗粒 上的拖曳力影响输运过程。Van wijk^[30]的试验研 究表明:颗粒形状对颗粒的水力输运过程影响很 大,尖锐颗粒导致颗粒群内粒子的移动性很有限, 这是由于颗粒间有很大的接触面积引起的,而对于 理想球形颗粒只有一个接触点,因此不规则颗粒会 促进颗粒群生成,易引发堵塞。在静止流体中沉降 的颗粒所受的阻力 **F**。为:

$$\boldsymbol{F}_{D} = \frac{1}{2} C_{D} \frac{\pi d_{p}^{2}}{4} \rho_{f} \boldsymbol{u}_{p}^{2}$$
(7)

式中: C_D 为拖曳力系数;在高粒子雷诺数(Re_p)下, 球形颗粒 $C_D \approx 0.44$,对于砂粒形, $C_D \approx 0.9^{[30]}$; d_p 为 颗粒的直径; ρ_f 为流体密度($\operatorname{kg/m^3}$); u_p 为颗粒的 速度($\operatorname{m/s}$)。颗粒形状主要通过改变拖曳力系数 C_D 来改变作用于颗粒自身的水动力。根据颗粒相 对雷诺数 Re_r 的不同,球形颗粒的拖曳力系数 C_D 有 不同的计算公式,习惯上称 $\operatorname{Re}_r < 1$ 的情况为层流 区, $\operatorname{l} < \operatorname{Re}_r < 10^3$ 称为过渡区, $\operatorname{Re}_r > 10^3$ 称为湍流区, 不同的区域内阻力系数采用不同的公式来计 算 $[^{31-32}]$,如表4所示 $[^{32}]$ 。

表 4 拖曳力系数与相对雷诺数的关系

 Table 4 Relationship between drag coefficient and relative

 Reynolds number

Re _r 范围	表达式
Re _r ≤0.01	$C_D = \frac{24}{\operatorname{Re}_r} \left(1 + \frac{3}{16} \operatorname{Re}_r \right)$
0.01 <re<sub>r ≤20</re<sub>	$C_D = \frac{24}{\text{Re}_r} (1 + 0.131 \ 5 \ \text{Re}^{0.82 - 0.05w})$
$20 \leq \mathrm{Re}_r \leqslant 260$	$C_D = \frac{24}{\text{Re}_r} (1 + 0.193 \ 5 \ \text{Re}_r^{0.630 \ 5})$
260≤Re _r ≤1 500	$\log C_D = 1.643 \ 5 - 1.124 \ 2w + 0.155 \ 8w^2$
$1\ 500 < { m Re}_r \leqslant 1.2 imes 10^4$	$\log C_D = -2.457 \ 1 + 2.555 \ 8w - 0.929 \ 5w^2 +$
	$0.104 \ 9w^3$
$1.2 \times 10^4 < \mathrm{Re}_r \leq 4.4 \times 10^4$	$\log C_D = -1.918 \ 1 + 0.637w - 0.063 \ 6w^2$
$4.4{\times}10^4{<}Re_r{\leqslant}3.38{\times}10^5$	$\log C_D = -4.339 + 1.580 \ 9w - 0.154 \ 6w^2$
$3.38 \times 10^5 < \mathrm{Re}_r \leq 4 \times 10^5$	$C_D = 29.78 - 5.3w$
$4 \times 10^5 \le \mathrm{Re}_r \leqslant 1 \times 10^6$	$C_D = 0.1 w - 0.49$
$1 \times 10^{6} < \mathrm{Re}_{r}$	$C_D = 0.19 - \frac{8 \times 10^4}{\mathrm{Re}_r}$

其中:w=logRer是以10为底的对数。

需要指出的是,上述拖曳系数是基于球形颗粒假 定的,然而工程技术中所遇到的固体颗粒大多是非球 形的,因此应用前文中的球形颗粒阻力系数是有条件的。一般的做法是引入一个与颗粒形状有关的修正 系数。常用的修正系数是形状系数 φ, φ 定义为等体 积的球形颗粒的表面积 f_{sp} 与非球形颗粒表面积 f之比 ($\varphi = f_{sp}/f$)。这样,非球形颗粒在小雷诺数 (Re, <1)下的阻力系数可用式(8)计算^[31]:

$$C_{D} = \frac{24}{0.843 \lg \frac{\phi}{0.065} \operatorname{Re}_{r}}$$
(8)

长沙矿冶研究院对深海锰结核的形状系数和 阻力系数关系做了大量的试验研究,研究表明拖曳 力系数可以用式(9)表示^[33]:

$$C_D = 0.52S_f^{A00}$$

$$S_f = \frac{c}{\sqrt{ab}} \tag{9}$$

其中:S_f为形状系数。注意:该式不适用于计算玻 璃球颗粒的阻力系数。

形状是一个相对模糊的参数,可简化成表 5^[30], 该表按球度(表示与球体的相似性)和棱角度(Angularity,表面光滑程度)对粒子分类。球度越小,棱角度 越高,拖曳力越大。对于极端不规则的颗粒,拖曳力 还与粒子在流体中的朝向有关。在大颗粒雷诺数下 (Re_r>200),对于具有高球度且圆滑的颗粒,拖曳系 数大约在 0.4~0.5 之间,对于棱角度很大的颗粒且球 度较低,拖曳系数在大雷诺数下大约为 1~2^[30]。

表 5 颗粒形状分类

Table 5	Particle	shape	classification
---------	----------	-------	----------------

分类	高球度	低球度
非常圆的		
圆形的		
较圆的	3	en e
较尖锐的	Ş	(Alter)
尖锐的	9	the main and the second
非常尖锐的		

61

颗粒密度主要影响颗粒的有效重力,有效重力 F_{eg}为:

$$\boldsymbol{F}_{\rm eg} = \frac{\pi d_{\rho}^{3}}{6} \left(\rho_{\rho} - \rho_{f} \right) \boldsymbol{g}$$
(10)

式中: g 为重力加速度(m/s²); ρ_{μ} 为颗粒密度 (kg/m³)。有效重力越大,颗粒在静止流体中的终端沉降速度越大。颗粒在无限流域中的终端沉降 速度大小 u_{t} 为:

$$u_t = \sqrt{\frac{4d_p \left(\rho_p - \rho_f\right)g}{3C_D \rho_f}} \tag{11}$$

该值是通过令拖曳力与等效重力相等推导得 到的,因此终端沉降速度取决于拖曳力系数 C_D 、粒 径 d_p 、颗粒密度 ρ_p 及流体密度 ρ_f 。而提升速度应 该是固体颗粒终端沉降速度 u_t 的 3~5倍^[34-35]。

需要指出的是:颗粒粒径 d_p对管道流这种受限 流动同样有很大影响,当 d_p/D 很大时(D 是立管 直径),立管对粒子最终沉降速度有很大影响,因为 此时粒子周围的回流区域面积有限^[30-33]。为了修 正这一效应,可采用 Newton 给出的壁面因子 f_{wall} (Wall Factor)修正^[36],如下,该式最适合用于描述 完全湍流的沉降区:

$$f_{wall} = \left[1 - \left(\frac{d_p}{D}\right)^2\right] \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{d_p}{D}\right)^2} \quad (12)$$

该壁面因子与陈光国等^[33]给出的壁面因子不同,在陈光国等的研究中,壁面因子如下:

$$f_{wall} = 1 - \left(\frac{d_p}{D}\right)^{1.5} \tag{13}$$

结合无限流域终端沉降速度 u_t,可得修正后的 立管内最终沉降速度:

$$u'_{t} = u_{t} \cdot f_{wall} \tag{14}$$

受阻沉降理论主要用于描述沉积物和沙粒的 沉降速度,经常用于流化床的速度描述^[37]。这些应 用的共同之处在于:与提升管或流化柱相比,颗粒 尺寸非常小:*d*_p/D 值在 10⁻²或更小的数量级。但 Van wijk^[30]的实验结果表明,*d*_p/D 在 10⁻¹或更大 的颗粒的体积固体浓度与固体输运速度之间的一 般关系也可以用受阻沉降理论来描述。但要注意 的是实验数据存在一定非线性,而模型预测值为直 线,这表明虽然这个模型涵盖了大部分范围但并不 能涵盖所有的物理现象。这种影响在 Xia 等^[19]的 数据中更为明显,其中的实验数据具有显著的非线 性。这种影响可能是由于颗粒和立管壁之间的摩 擦的重要作用。在受阻沉降理论中,材料的大部分 远离壁面,不需要考虑壁面摩擦(颗粒的重量完全 由流体携带)。在沉降试验和流态化试验中, Van wiik^[30]发现由于受阻沉降,粒子的速度比预测的要 慢得多,虽然宏观行为遵循受阻沉降理论,但量级 不符合。在测试过程中,可以清晰地听到粒子与壁 之间的碰撞,并且观察到终端沉降速度比理论预期 的要小得多。这使得由碰撞产生的壁面摩擦对传 输速度有显著影响的说法非常可信。大颗粒很容 易穿透气流的边界层,所以每次碰撞都可能发生机 械摩擦。由于在 d/D 较大时,截面上粒子的数量非 常有限,因此一个粒子的摩擦对整体行为的影响比 在小的 d_b/D(数)时大得多。另一个导致实验速度 大小与理论值预测不同的原因可能是沿着立管截 面的浓度分布不均,在靠近立管壁面处,颗粒浓度 通常比立管中心要低得多[38]。

此外,用于估计混合物流动中壁面碰撞支配颗 粒运动的颗粒尺寸大小的经验准则表明^[39]:在深海 采矿作业中发现的典型流动条件下,锰结核的动力 学确实是由惯性控制的(可用 St 数反映颗粒的惯性 效应,St≫1则为惯性主导),这与锰结核大直径有 关,该准则为^[19]:

$$d_{p} > \sqrt{\frac{18\mu D}{0.7kV_{s}\rho_{s}}} \tag{15}$$

式中: d_{ρ} 为固体颗粒直径;D为管道内部直径; μ 为 流体动力学黏度系数; ρ_s 为固体的密度; V_s 为粒子在 流动方向的平均速度, $k = V_s$ '/ V_s , V_s 是横向速度 波动。粒子的最大波动速度 V_s '小于平均流体速度 的 0.2^[40]。该准则结合相关变量的典型数值(D =100 mm, $\rho_s = 2$ 000 kg/m³, $V_s = 1$ m/s, $\mu = 1.002$ g/m/s,k = 0.2)得出满足粒子运动由惯性主导的最 小直径尺寸为 2.5 mm^[19]。因此,暗示在立管中发 现的典型锰结核运动由惯性支配。因此,流动湍流 对结核动力学没有显著的影响,结核对平均流动的 变化反应缓慢^[19]。需要注意的是与水平管道中的 混合物流动相反,向上流动的固体不会沉积在垂直 管道的壁面上。由于受 Magnus 力和 Saffman 力^[41]的作用,颗粒在轴流中心区域中运动,固体之间的相互作用不可忽视。

4 物理特性对颗粒破碎的影响及其后果

颗粒在水力输运过程中,由于和管壁摩擦、受 泵叶碰撞以及颗粒之间的摩擦,会不断降解碎裂。 在垂直立管中,两种机制主导了降解过程[6]:第一种 是颗粒沿立管段滑动引起的磨损,这主要是靠近管 壁结核的情况。第二种机理是立管段内颗粒一颗 粒相互作用的降解。不同粒径的不同颗粒具有不 同的输运速度,它们的相对速度会引起碰撞,可能 会产生轻微的冲击碎裂、碎裂和摩擦。需要指出的 是:由于 Magnus 旋转升力的影响,立管壁面附近的 大粒子体积分数很小甚至接近于 0[42], 而细颗粒对 管壁的磨损率很低[6]。因此,可以认为结核在运输 过程中的降解主要是由于离心泵的影响,管道壁面 对颗粒的影响较弱。在多级提升电泵的每一级中, 结核会受到叶轮的多次冲击,使结核在输送过程中 被泵断裂更严重[3]。由式(8)至式(11)可知,颗粒所 受水动力受粒径,拖曳力系数(颗粒形状)的影响, 因此,随着颗粒碎裂,颗粒的输运行为也将发生变 化,细颗粒输运更快,可能赶上前面输运的粗颗粒, 导致局部颗粒浓度骤增,引发堵塞问题^[43]。因此, 应尽可能优化矿浆泵的转速和流道设计,降低矿石 颗粒在泵中的降解。目前已有一些颗粒破碎模型, 但这些模型都需要实际的试验数据进行标定,才能 确定相应的模型常数。

5 结论

本研究基于最新的研究成果,总结了深海多金 属结核的物理特性参数,及各参数之间的关系,分 析了结核物理特性对结核采输过程的影响,得到以 下几点结论。

(1)多金属结核形成需要具有赖以生长的核心物质,需要有一定的稀有金属物质来源,且具有一定的构造机理和适宜的地球化学环境。

(2)结核形状多样,大多为球粒状(马铃薯状)、 椭球状、菜花状、扁平状及各种连生体,且断面具有 典型的年轮特性。在自然状态下,1/3的结核重量 是孔隙海水,体积密度在 1.90~2.05 g/cm³之间变 化,含水量在 40%~55%之间变化;结核强度随结 核大小的增加而减小,可采用对数函数表示单轴抗 压强度与结核粒径之间的关系。锰结核的平均粒 径和质量两者之间具有中等强的相关性,可采用 copula联合概率密度函数进行描述。

(3)结核以二维沉积形式大量存在于松散的沉积物一水界面,有时埋藏在不同深度的沉积物中, 近似随机分布,绝大多数赋存于深 3.5~6.1 km 的 洋底表面或深 1 m 的海泥内。

(4)在高压下岩石表现出更强的延性,使得裂 纹的产生和扩展变得更加困难,导致更高的切削力 和更高的功耗。在浅水深度,切削机构主要是脆性 的,产生的裂纹主要为拉伸裂纹;深水时岩石切割 过程以延性为主,产生的裂纹主要为剪切裂纹。

(5)颗粒尺寸、形状、密度是影响水力输运过程 的主要参数,其中颗粒尺寸通过改变 St 数和管内的 受阻沉降影响颗粒在流体中的运动状态,形状影响 有效拖曳力系数,密度等效重力,这些参数关系到 颗粒输运破碎和堵塞问题,需对颗粒的破碎特性和 规律进行研究。

参考文献(References):

- [1] HALKYARD J E. Deep ocean mining for manganese nodules
 [J]. Phys Technol, 1979, 10, 236-243.
- [2] 李国胜. 东太平洋 CC 区多金属结核的地质学特征及形成环境
 [J]. 地质与资源, 2008, 17(4): 286-291.
 LI Guosheng. Geological characteristics and formation environment of polymetallic nodules in east Pacific CC zone [J]. Geology and Resources, 2008, 17(4): 286-291.
- [3] LI Yan, LIANG Kesen, DAI Huan, et al. Degradation of Polymetallic Nodules in Deep-sea Multi-Stage Lifting Motor Pump[J]. Minerals, 2021, 11: 656.
- [4] DREISEITL I. About geotechnical properties of the deep seabed polymetallic nodules [C]// 18th International Conference on the Transport and Sedimentation of Solid Particles, Prague, Czech Republic,2017,11-15.
- [5] VAN WIJK J M, DE HOOG E. Size reduction of CCZ polymetallic nodules under repeated impact fragmentation [J]. Results in Engineering, 2020, 7: 100154.
- [6] DE HOOG E, VAN WIJK J M, WIJNANDS J, et al. Degradation of polymetallic nodules during hydraulic transport under influence of particle-wall and particle-particle interaction [J]. Minerals Engineering, 2020, 155 (106415): 1-11.
- [7] RAVELET F, BAKIR F, KHELLADI S, et al. Experimental

study of hydraulic transport of large particles in horizontal pipes [J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2013, 44, 45: 187-197.

- [8] VLASAK P, CHARA Z, KONFRST J, et al. Experimental investigation of coarsegrained particles in pipes [C]//16th International Conference on the Transport and Sedimentation of Solid Particles, Rostock, Germany, 2013, 60: 3969-3992.
- [9] 陶春辉,陈建林,张金辉,等.多金属结核粒径分形特征初步研究[J].海洋学报(中文版),2000(1):69-75.
 TAO Chunhui, CHEN Jianlin, ZHANG Jinhui, et al. Study on fractal characteristics of particle size of polymetallic nodules [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000 (1):69-75.
- [10] DREISEITL I. Deep sea exploration for metal reserves-objectives, methods and look into the future [C]//West Pomerania Deep Sea Mining Conference, Szczecin, Poland, 2016.
- [11] 黄永样.多金属结核生长史讨论[J].海洋地质动态,1992 (12):3-4.

HUANG Yongyang. Discussion on the growth history of polymetallic nodules[J]. Marine Geology Letters, 1992(12): 3-4.

- [12] 段飞达.西太平洋富钴结壳和多金属结核的生长速率、元素 分布特征及磷酸盐氧同位素[D].厦门:厦门大学,2017.
 DUAN Feida. Studies on growth rates, elemental distribution and phosphate oxygen isotopes of Fe-Mn deposits from the western Pacific[D]. Xiamen :Xiamen University, 2017.
- GOTO K T, ANBAR A D, GORDON G W, et al. Uranium isotope systematics of ferromanganese crusts in the Pacific O-cean: Implications for the marine ²³⁸U/²³⁵U isotope system
 [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 146; 43-58.
- PEUCKER-EHRENBRINK B, RAVIZZA G, HOFMANN A W. The marine¹⁸⁷ Os/¹⁸⁶ Os record of the past 80 million years [J]. Earth and Planetary Science Letters. 1995, 130(1 -4): 155-167.
- [15] KOTLINSKI R. Metallogenesis of the world's ocean against the background of oceanic crust evolution [M]. Polish Geological Institute, Special Papers 4, Warszawa, 1999.
- [16] 朱敏.大洋多金属结核的开采[J]. 金属矿山, 1992 (8): 18 -24.

ZHU Min. Mining of polymetallic nodules in ocean[J]. Metal Mine,1992 (8):18-24.

- [17] MULLER T, VAN WIJK J, MISCHO H. EU Blue Mining project-building a large scale test system and flow tests for vertical transport systems in deep sea mining (original in German)[R]. 2018.
- [18] DREISEITL I. Geotechnical properties of polymetallic nodules in the Interoceanmetal (IOM) exploration area, in proc[C]//Under-

water Mining Institute conf., Tongji University, Shanghai, 2012.

- [19] XIA J X, NI J R, MENDOZA C. Hydraulic lifting of manganese nodules through a riser [J]. Journal of offshore and mechanics and arctic engineering. 2004. 126(1): 72-77.
- [20] MORGAN C L, NICHOLS J A, SELK B W, et al. Preliminary analysis of exploration data from pacific deposits of manganese nodules [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 1993, 11(1): 1-25.
- [21] KIM Saekyeol, CHO Su-gil, LIM Woochul, et al. Probability distribution for size and mass of a nodule in the KR5 area for the development of a manganese nodule miner [J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 131-138.
- [22] SUP H, JONG-SU C, JIN-HA K, et al. A note on design and operation of waterjet nodule lifter of manganese nodule collector [C]// Int. J. Offshore Polar, 2001, 11 (3): 237 -239.
- [23] JOHNSON R B, DEGRAFF J V. Principles of Engineering Geology [M]. New York: John Wiley & Sons, 1988.
- [24] NEIZVESTNOV J V, KONDRATENKO A V. Engineering geology of the Clarion Clipperton Ore Province in the Pacific Ocean[R]. Nauka, Sankt Petersburg, 2004.
- [25] ZARUBA Q, MENCL V. Engineering geology[M]. Amsterdam: Elsevier Publishers, 1976.
- [26] ZENHORST J. Degradation of poly-metallic nodules in a dredge pump [D]. MSc thesis, Delft University of Technology. 2016.
- [27] HIRAMATSU Y, OKA Y, Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1966,3 (2):89-90.
- [28] ALVAREZ GRIM M, VAN GELDER R A C, HEEREN J, et al. Into the deep: A risk based approach for research to deepsea mining[R]. 2011.
- [29] YENIGül N B, ALVAREZ GRIMA M. Discrete element modeling of low strength rock[M]. London: Numerical Methods in Geotechnical Engineering-Benz & Nordal (eds). Taylor and Francis Group, 2010.
- [30] VAN WIJK J M, TALMON A M, VAN RHEE C. Flow assurance of vertical solid-liquid two phase riser flow during deepsea mining[C]// Houston, Texas, USA: Offshore Technology Conference Offshore Technology Conference, 2012.
- [31] 岑可法, 倪明江. 气固分离理论及技术[M]. 杭州:浙江大学 出版社, 1999.

CEN Kefa, NI Mingjiang. Theory and technology of gas-solid separation[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1999.

- [32] COMSOL. Multiphysics structural mechanics module user's guide [Z]. Cersion 3.5a, Burlington, USA, 2008.
- [33] 陈光国,阳宁,唐达生,等.垂直管道颗粒及颗粒群沉降运动规

律研究[J].泥沙研究,2010(4):16-21.

CHEN Guangguo, YANG Ning, TANG Dasheng, et al. Study on the settling regularity of solid particles in vertical pipelines, 2010(4): 16-21.

- [34] 申焱华,毛纪陵,凌胜.垂直管道固液两相流的最小提升水流 速度[J].北京科技大学学报,1999,21(6):519-522.
 SHEN Yanhua, MAO Jiling, LING Sheng. Minimum lifting water velocity of solid-liquid two-phase flow in vertical pipe
 [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999,21(6):519-522.
- [35] SELLGREN A. The choice of operating velocity in vertical solid-water pipeline systems [J]. Hydrotransport, 1982, 8: 211-220.
- [36] CHHABRA R P, AGARWAL S, CHAUDHARY K. A note on wall effect on the terminal falling velocity of a sphere in quiescent Newtonian medium in cylindrical tube [J]. Powder Technology, 2003, 129: 53-58.
- [37] GIDASPOW. Multiphase flow and fluidization [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 1994.
- [38] BARTOSIK, SHOOK. Prediction of vertical liquid-solid pipe flow

using measured concentration distribution [J]. Particulate Science and Technology, 1995, 13: 85-104.

- [39] SOMMERFELD M. Modeling of particle-wall collisions in confined gasparticle flows[J]. Int. J. Multiphase Flow, 1992, 18: 905-926.
- [40] ASAKURA K, ASARI T, NAKAJIMA I. Simulation of upward solidliquid flows in a vertical pipe[J]. Shigen-to-Sozai, 1994, 110(12): 973-979.
- [41] NEWITT D M, RICHARDSON J F, GLIADON B J. Hydraulic conveying of solids in vertical pipes[J]. Trans. Inst. Chem. Eng., 1961, 39: 93-100.
- [42] VAN WIJK J M. The influence of nodule degradation on the vertical hydraulic transport of manganese nodules [C]//In Proceedings of the 18th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles, Prague, Czech Republic, 11-15 September 2017.
- [43] VAN WIJK J M, SMIT P M. Design and internal flow simulation of a vertical hydraulic transport system for mining manganese nodules [C]//17th International conference on transport and sedimentation of solid particles. 22-25 September, Delft, The Netherlands, 2015.