



散装精粉矿海上运输的 流态化机理

李晨 / 刘曙 / 周健 著

东华大学出版社

散装精粉矿海上运输的流态化机理

李晨 刘曙 周健 著

东华大学出版社

· 上海 ·

内 容 简 介

精粉矿流态化机理的研究对精粉矿海运安全具有重要意义。本书借鉴岩土力学中的相关研究方法,利用模拟试验研究船载散装矿产品在波浪荷载作用下的动力学特征,建立能够模拟散装精粉矿的颗粒流本构模型及其参数,深入分析波浪荷载作用下船载散装矿产品发生流态化的宏细观机理,提出相应的流态化判别方法、检测方法,在此基础上建立船载散装矿产品流态化引起重大安全事故的风险评估体系和预警模式。

本书可供从事精粉矿流态化研究的科研人员使用,也可供海上矿产品运输相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

散装精粉矿海上运输的流态化机理 / 李晨, 刘曙, 周健著. —上海: 东华大学出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5669-0935-0

I. ①散… II. ①李…②刘…③周… III. ①散装货物运输—粉状货物运输—海上运输—流态化—研究 IV. ①U695.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 249550 号

责任编辑: 竺海娟

封面设计: 魏依东

散装精粉矿海上运输的流态化机理

Sanzhuang Jingfenkuang Haishang Yunshu de Liutaihua Jili

李 晨 刘 曙 周 健 著

出 版: 东华大学出版社 (上海市延安西路 1882 号 邮政编码: 200051)

本 社 网 址: <http://www.dhupress.net>

天猫旗舰店: <http://dhdx.tmall.com>

营 销 中 心: 021-62193056 62373056 62379558

印 刷: 常熟大宏印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 17

字 数: 478 千字

版 次: 2015 年 12 月第 1 版

印 次: 2015 年 12 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5669-0935-0/U·002

定 价: 75.00 元

前 言

作为国民经济的重要支柱，进出口矿产品直接关系到我国经济的健康、稳定与可持续性发展。我国是全球最大的铁矿石、煤炭进口国，也是世界上最大的氟石出口国。进出境矿产品在进出口贸易的同时，其运输安全越来越受到关注。

进出境矿产品主要的运输方式是散装海洋运输。散装矿产品在储存和运输过程中往往需要采用人为喷水的方式来控制它的中心层温度或者克服粉尘飞扬等问题。矿产品自身含水量加上人为喷水等因素往往导致其海运时发生流态化风险增高。散装矿产品（如煤炭、铁精粉、氟石等）在海洋运输过程中，曾发生过多起船只倾斜或沉没事故，造成人员伤亡和财产惨重损失。货轮倾覆虽是多种因素共同作用的结果，但含水率高的散装矿产品发生“流态化”是导致事故的主要因素之一。根据国际海事组织（IMO）海上安全委员会（MSC）制定的《固体散货安全操作规则》（简称《IMSBC Code》）定义，流态化是指颗粒状物质内饱含液体时，由于震动、撞击或船舶摇摆等外部因素的影响，丧失其内部抗剪强度而呈现出如同液体一样的状态。《IMSBC Code》中将易流态化货物归类为 A 类危险品，对于具有流态化风险的 A 类危险品，装船前货主必须向运输方提供货物相应的适运水分限量（Transportable Moisture Limited，简称 TML）检验证书，以上规则各缔约国从 2011 年 1 月 1 日起强制实施。为了保障进出境矿产品的正常贸易，保障水运船只的航运安全，保护人员的生命安全，开展散装精粉矿流态化机理研究具有重要意义。

本书借鉴岩土力学中的相关研究方法，利用模拟试验研究船载散装矿产品在波浪荷载作用下的动力学特征，建立能够模拟散装精粉矿的颗粒流本构模型及其参数，深入分析波浪荷载作用下船载散装矿产品发生流态化的宏观机理，提出相应的流态化判别方法、检测方法，在此基础上建立船载散装矿产品流态化引起重大安全事故的风险评估体系和预警模式。具体内容有：

（1）通过动三轴和空心圆柱扭剪试验，讨论不同含水率、动应力下精粉矿单元体的动力特性，通过对动应变、动强度和孔隙水压力变化曲线进行分析，分析了各因素对精粉矿动力特性的影响，确定了影响精粉矿动力破坏的关键因素，为室内小型振动台模型试验、动力离心试验、数值模拟和精粉矿流态化判别提供了理论基础。

（2）通过室内振动台试验，考虑不同含水率、加速度、密实度、细粒含量等因素的影响，揭示散装精粉矿在缩尺条件下的流态化机理。

（3）通过离心机模型试验重现了实际重力场条件下铁精矿的真实动力响应，解决了小型振动台试验无法达到原型应力场的问题，通过和室内小型振动台的试验结果的对比，对精粉矿流态化机理有了更准确的认识，为建立流态化风险评估体系和预警模型提供理论基础。

（4）通过数值模拟方法与室内动三轴试验、室内小型振动台模型试验、离心机试验等

结果的验证对比,得到散装矿产品在波浪荷载作用下的动力响应过程,研究散装矿产品颗粒在波浪荷载作用下流态化形成过程中的宏观响应和细观组构变化特征。

(5) 采用流盘试验对散装矿产品的流动水分点进行测定,并对比流盘试验和室内模型试验,结合两试验方法的优点,分别对散装矿产品流态化形成的影响因素进行了研究分析。基于流盘试验和室内模型试验所得出的加速度、含水率和细粒含量对散装矿产品流态化影响的定性分析和定量数据,结合层次分析法建立了散装矿产品流态化风险预警模型,提出了船运散装矿产品流态化风险预警方法。

本书凝聚了作者在精粉矿流态化方面的最新研究成果,由李晨、刘曙、周健、简琦薇、白彪天、于仕才、杜强、谢鑫波进行研究并执笔完成。全书内容共分六章:第一章,绪论(李晨,刘曙);第二章,散装精粉矿动力特性室内试验(李晨,周健,简琦薇);第三章,散装精粉矿流态化室内模型试验(李晨,白彪天,周健);第四章,散装精粉矿流态化离心机试验(周健,简琦薇,白彪天);第五章,散装精粉矿流态化数值模拟(刘曙,于仕才,杜强);第六章,海运安全风险预警模型及预防措施(刘曙,于仕才,谢鑫波)。全书由李晨、刘曙和周健统稿,白彪天负责整理并协助定稿。

本书在编写中引用了许多专家、学者在科研和实际工程中积累的大量资料和研究成果,由于篇幅有限,本书仅列出了主要参考文献,并按惯例将参考文献在文中一一对应列出,在此特向所有参考文献的作者表示衷心的感谢。

本书的研究成果得到了国家质检总局公益性行业科研专项(201310065)、国家质检总局科技项目(2010IK029、2015IK217)的资助,在此表示感谢!

散装精粉矿流态化机理的研究是一个涉及到安全、力学、信息学的综合性研究。随着人们对这类流态化危害关注程度的不断提高,会有更多的学者和技术人员投入到这方面的研究中。总的来说,关于精粉矿流态化工程力学方面的研究刚刚起步,对其研究还有许多工作需要展开,希望本书能起到抛砖引玉的作用,为更深入的进行精粉矿流态化机理的研究打下基础。由于作者水平有限,书中不足、欠妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论

1.1 引言	1
1.2 流态化研究综述	2
1.2.1 精粉矿流态化概述	2
1.2.2 国内外流态化研究	4
1.3 与精粉矿安全运输相关的法规文件	6
1.3.1 国际海事组织 (IMO)	6
1.3.2 国际船级社协会 (IACS)	7
1.3.3 中国船级社 (CCS)	7
1.3.4 中华人民共和国国交通运输部	7

第二章 散装精粉矿动力特性室内单元试验

2.1 引言	9
2.2 试验设备	9
2.2.1 GDS 动三轴仪	9
2.2.2 GDS 空心圆柱扭剪仪	10
2.3 铁精矿动三轴试验研究	13
2.3.1 试验设计	13
2.3.2 铁精矿动力特性分析	16
2.3.3 铁精矿动三轴试验小结	20
2.4 氟石动三轴试验研究	20
2.4.1 试验设计	20
2.4.2 氟石动力特性分析	22
2.4.3 氟石动三轴试验小结	27
2.5 镍矿动三轴试验研究	28
2.5.1 试验设计	28
2.5.2 变形特征分析	31
2.5.3 孔压变化规律	36
2.5.4 镍矿动三轴试验小结	41
2.6 铁精矿空心圆柱扭剪试验研究	42
2.6.1 试验设计	42
2.6.2 铁精矿动力特性分析	46

2.6.3 铁精矿空心圆柱扭剪试验小结	52
2.7 本章小结	53

第三章 散装精粉矿流态化室内模型试验

3.1 引言	54
3.2 试验设备	54
3.2.1 室内小型振动台	54
3.2.2 数据量测与采集装置	55
3.3 铁精矿模型试验	58
3.3.1 试验设计	58
3.3.2 铁精矿流态化机理研究	65
3.3.3 不同细粒含量铁精矿流态化过程研究	91
3.3.4 铁精矿模型试验小结	109
3.4 氟石模型试验	110
3.4.1 试验设计	111
3.4.2 氟石流态化机理研究	112
3.4.3 不同细粒含量氟石流态化过程研究	118
3.4.4 氟石模型试验小节	121
3.5 镍矿模型试验	122
3.5.1 试验设计	122
3.5.2 镍矿流态化机理研究	123
3.5.3 镍矿模型试验小节	127
3.6 本章小节	128

第四章 散装精粉矿流态化离心机试验

4.1 引言	129
4.2 试验设备	129
4.2.1 同济大学离心机	129
4.2.2 量测与采集装置	131
4.3 离心模型试验研究	136
4.3.1 试验设计	136
4.3.2 流态化宏观演化规律	142
4.3.3 流态化细观规律	163
4.3.4 流态化形成机理	169
4.3.5 影响因素分析	171
4.3.6 室内与离心模型试验对比	173
4.4 本章小结	175

第五章 散装精粉矿流态化数值模拟

5.1	引言	178
5.2	数值方法的选择与改进	179
5.2.1	数值方法的选择	179
5.2.2	PFC3D 简介	180
5.2.3	模拟方法的改进	180
5.2.4	小结	182
5.3	动三轴试验的数值模拟研究	183
5.3.1	数值模型的建立	183
5.3.2	数值模拟的步骤	183
5.3.3	数值模拟结果与分析	184
5.3.4	小结	185
5.4	室内振动台试验的数值模拟研究	185
5.4.1	模型试验参数	185
5.4.2	数值模型的建立	186
5.4.3	数值模拟的步骤	187
5.4.4	数值模拟结果与分析	188
5.4.5	小结	192
5.5	离心机试验的数值模拟研究	192
5.5.1	离心机试验参数	192
5.5.2	数值模型的建立	194
5.5.3	数值模拟的步骤	195
5.5.4	数值模拟结果与分析	196
5.5.5	小结	199
5.6	船运实际状态的数值模拟研究	200
5.6.1	模型的建立	200
5.6.2	数值模拟的步骤	201
5.6.3	数值模拟结果与分析	202
5.6.4	小结	204
5.7	本章小结	204

第六章 海运安全风险预警模型及预防措施

6.1	引言	205
6.2	主要研究内容	205
6.3	风险预警的数学模型	206
6.3.1	风险预警方法概述	206
6.3.2	预警模型的选择	208
6.4	相关试验研究	209
6.4.1	散装矿产品的流盘试验	209
6.4.2	流盘试验与室内模型试验的相关性分析	212

6.4.3	试验结果分析	214
6.4.4	小结	222
6.5	流态化预警模型研究	222
6.5.1	散装矿产品流态化的关键影响因素研究	222
6.5.2	基于层次分析法的矿产品流态化风险预警模型的构建	225
6.5.3	小结	235
6.6	风险预警方法及应用	235
6.6.1	船运散装矿产品流态化风险预警的方法	235
6.6.2	风险预警方法的程序实现	241
6.6.3	风险预警方法的应用	247
6.6.4	小结	247
6.7	精粉矿流态化预防措施	248
6.7.1	预设 PVC 排水管	248
6.7.2	上层铁精矿袋装处理	256
6.8	本章小结	260
附录：部分专有名词释义		262

第1章 绪 论

1.1 引言

进入 21 世纪以来,我国采矿、冶金工业发展迅速,矿产品进出口大量增加。受各种因素的影响,我国精粉矿(本书中如无特殊说明,精粉矿均是铁精矿、氟石和镍矿三种矿粉的统称)的进口量仍处于逐年增长之中,目前依然是供应偏紧。随着海上运输精粉矿的迅猛发展,我国港口吞吐量已连续几年位居世界第一。据不完全统计,2010 年我国进口镍矿约 2800 万吨,2011 年进口 4800 多万吨红土镍矿,而铁矿石进口量已达 5 亿余吨,居世界第一^①。

散装精粉矿的主要运输方式是散装海洋运输,其在储存和运输过程中往往需要采用人为喷水来控制中心层温度或者克服粉尘飞扬等问题。精粉矿散货自身含水量、露天存放时遭受雨淋及人为喷水等因素往往导致其海运时发生流态化风险增高。在运输过程中,由于波浪荷载及货船发动机的振动,精粉矿表面形成可移动的流态化物质,降低船体稳定性,导致船舶倾斜甚至翻沉。近年来,我国发生了多起载运精粉矿船舶沉船事故,造成船毁人亡的重大损失。

关于精粉矿流态化的研究,尽管已逐渐引起国内外注意,但还处于起步阶段。国内虽早在 1996 年已提出海上安全运输的问题,但主要集中在提醒船主在运输途中需要注意的问题,随后十几年关于矿粉的讨论也只是集中在节约宝贵资源上,对为什么会发生流态化的现象和矿粉发生失稳的问题没有提及。但是,随着人们对这类流态化危害关注程度的不断提高,会有更多学者和技术人员投入到这方面的研究中,以承担起相应的责任和义务,满足我国对外贸易和航运安全的要求。

本书通过室内单元体试验、室内小型振动台模型试验、动力离心模型试验和强度理论分析、数值模拟分析及建立风险评估模型等手段,详细分析了不同含水率、荷载频率、加速度、级配等因素对散装精粉矿动力特性的影响,研究了散装精粉矿在动力荷载下流态化形成的演化规律,建立了能够模拟矿产品流态化过程的颗粒流模型及其参数,深入分析了波浪荷载作用下船运散装矿产品发生流态化的宏观机理。在综合分析现场数据、室内试验与数值模拟结果的基础上,确定了合理的矿产品流态化临界范围,提出了船运散精粉矿流态化判别标准、检测方法和流态化预防措施,建立了船运散矿流态化风险评估体系及预

^①蔡观.世界散货海运纪实 [J].世界海运,1998,21(4):32-32.

警模型。从而从源头上对流态化危害进行有效管控，具有重要的科学意义和实际应用价值。

1.2 流态化研究综述

1.2.1 精粉矿流态化概述

“流态化”一词最先使用于化工领域，指的是流体与固体之间的相互作用，使固体颗粒悬浮在流体中或随流体一起流动^{①②}。

铁精矿、氟石、镍矿均属于国际海事组织颁布的《国际海运固体散货规则》（《IMSBCCODE》）^③中规定的易流态化危险品。当货物发生流态化现象后（图 1.1），其流动性和流速度加大，造成货物流向船舶一侧，船舶稳定性降低，导致船舶倾覆。

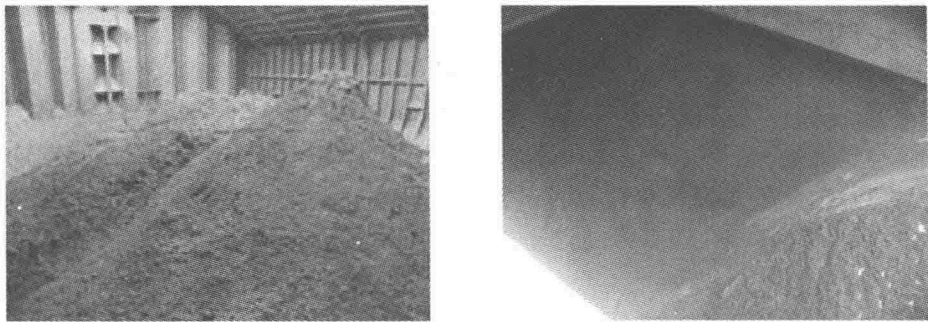


图 1.1 舱内铁精矿散货发生流态化现象之前和之后

1.2.1.1 我国精粉矿散货进出口现状

矿产资源是人类社会得以发展的重要物质基础，自世界各国进入工业化发展阶段以来，矿产资源的消耗快速增长，然而全球矿产资源储量空间分布极不均匀，不同国家和地区拥有的矿产资源种类和数量差异十分明显。基于上述情况，近年来海上运输精粉矿发展迅速，我国采矿、冶金工业迅速发展，对外贸易量逐年增加，精粉矿货物的运输量越来越大，而其中绝大部分主要靠海上运输。

我国是世界上氟石资源最多的国家之一，氟石产量居世界第 1 位，约占世界总量的 1/2，美国从 1997 年起对氟石采取了限制开采的政策，美国本土不再开采氟石，50 万~70 万吨的年消费量主要依靠进口和战略储备，其中 63% 从中国进口。20 世纪 90 年代以来，我国一直是世界上最大的氟石出口国，主要出口日本、美国、荷兰、印度、意大利、韩国等。

镍矿是一种重要战略矿产资源，影响国民经济命脉。我国镍矿储量稀少，品位很低，而且矿区主要集中在山区，交通不便，使得国内镍矿生产、运输及冶炼成本很大，因此，我国镍矿原料主要从菲律宾和印尼等国家进口。据不完全统计，2010 年我国进口镍矿约

①Oger G, Donng M, Alessandrini B, Ferrant P. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries [J]. Journal of Computational Physics, 2006, 213 (02): 803—822.
②Shen J. Nickel ore and its safe shipment [J]. Advanced Materials Research, 2011, 396—398: 2183—2187.
③International Marine Organization. The code of safe practice for solid bulk cargoes (BC Code) [Z]. 2004.

2800 万吨, 2011 年中国从印尼、菲律宾进口 4800 多万吨红土镍矿。^①

铁矿粉, 是由铁矿石 (含有铁元素或铁化合物的矿石) 经过选矿、破碎、分选、磨碎等加工处理而成的矿粉, 常应用于冶金行业、建筑行业、造船业、机械行业、飞机制造等对钢材需求量大的行业。而铁精矿是指进口矿粉中的高品位矿石直接粉碎到一定细度的精选铁矿粉, 是我国进出口的重要固体散货材料之一。作为全球最大铁矿石需求国, 我国仅 2009 年进口铁矿石 6.28 亿吨, 其中铁精矿占到二分之一^②。

1.2.1.2 流态化引起的海运事故

如此大批的进口需求量, 首要解决的是运输问题, 精粉矿货物作为固体散装货物的一种, 其主要运输方式是海洋运输。然而在精粉矿的运输过程中, 经常为了控制中心层温度和粉土飞扬而实行人工喷水。精粉矿产品自身含水量、露天存放时遭受雨淋, 以及人为喷水等因素, 往往造成精粉矿货物具有较高的含水量。

在航运过程中, 船舶遇到风浪产生摇摆和振动, 精粉矿货物随船舶颠簸, 其表面往往形成可移动的流态化物质, 导致船舶倾斜 (见图 1.2), 对船舶安全构成严重威胁, 极易发生重大海难事故。即使不是在恶劣的天气中航行, 也存在货物流向或滑向一侧的危险性。如遭遇恶劣气象条件, 则更加危险, 船上人员往往来不及自救甚至求救, 船舶已经沉没。

近年来随着航运业的飞速发展, 高级船员的紧缺和提升节奏的加快, 船员综合素质呈下降态势, 船员包括船长缺乏足够的航海经验, 以及人们对运输安全意识的淡化, 沉船或重大海损事故时有发生。



图 1.2 载运精粉矿货轮的海运事故

2009 年 9 月 9 日, “黑玫瑰号” 轻便型散货船, 挂蒙古国旗, 37657DWT, 船舶体长 187.73 米, 体宽 28.4 米, 吃水 10.8 米, 船员总共 27 名。该轮在印度帕拉迪布港满载印度出口到中国的 23847 吨铁矿砂, 驶离帕拉迪布港防波堤仅 3 海里, 船体严重倾斜, 在当地时间下午 18 时翻沉于帕拉迪布港进出口航道上, 船员大部分被印度帕拉迪布港的应急响应抢险队救起。事后查明是铁矿砂含水量超标, 船舶振动摇晃使铁矿砂发生流态化, 偏向于船体一侧所致。

2010 年 10 月 27 日, 巴拿马籍杂货船 “建富星” 号货轮装载约 43000 吨镍矿, 从印度尼西亚驶往我国山东途中, 航行经过台湾屏东鹅銮鼻外海 86 海里处, 由于船体严重倾斜, 船长宣布弃船, 并发出求救信号, 不久在屏东鹅銮鼻外海遇难倾覆、沉没, 整个沉船过程大约 10 分钟。

与精粉矿运载密切相关的船舶事故举不胜数, 载运精粉矿的散货船面临的风险决不亚

①曹时军. 关于红土镍矿安全运输的几个问题 [J]. 航海技术, 2012, (06): 22-24.

②孝建伟. 精选矿粉安全装运研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011.

于化学品船、危险品船、油轮和液化天然气船。因此,精粉矿临界含水量的把握,事关船舶财产和船员生命的安危,必须引起高度重视。

1.2.1.3 国内外对精粉矿运输的重视

近年来连续发生的因精粉矿流态化造成的海运事故引起了国际海运界的高度重视。IMO 下属的海上安全委员会(MSC)制定的《固体散货安全操作规则》(简称“BC Code”)已经将铁精矿由原先的 B 类危险品(具有化学危害性的物品)上升为 A+B 类危险品。建议包括铁精矿在内的四十多种易流态化 A 类危险货物在装运前发货人应提供实际水分含量和相应的适运水分限量(即 TML)检验证书^①。从 2009 年 1 月 1 日起,该规则自愿适用,但从 2011 年 1 月 1 日起,《IMSBC Code》将强制适用。我国是国际海事组织(IMO) A 类理事国,政府负有全面履行规则的义务。如果船舶装运固体散货时违反 BC Code 并发生海事事故,可能会被认为有过错而承担相应的法律责任^②。

我国早在 1988 年,交通部就颁发了为保证船舶运输精选矿粉及含水矿产品安全的《海运精选矿粉及含水矿产品安全管理暂行规定》^③。为贯彻该规定,2006 年 12 月,由国家技术监督局和交通部邀集部分口岸城市的产品质量监督检验所及航运、港埠企业在广州召开了《海运精选矿粉及含水矿产品安全检验方法》审定会,会上讨论并审定了《海运精选矿粉及含水矿产品安全检验规则》、《海运精选矿粉及含水矿产品分析试样的采取及制备方法》和《海运精选矿粉及含水矿产品平均含水率的测定方法》。《海运精选矿粉及含水矿产品安全管理暂行规定》第九条指出:凡使用一般货船装运水选精矿粉和被水浸湿过的矿产品,精选矿粉和矿产品的含水率不得超过适运含水率。

1.2.2 国内外流态化研究

目前,国内外相关研究大是集中在两个方面:一是对精粉矿货物的 FMP(称为流动水分点,Flow Moisture Point)的测定;二是对精矿粉在运输中防止流态化的安全措施以及经验控制等的研究。而精粉矿流态化形成的机理研究尚属初步阶段。

1.2.2.1 适运水分限量研究

当前国际海事组织引入“FMP”(称为流动水分点,Flow Moisture Point)的 90%来限定各类散装货物安全运输的适运水分限量(Transportable Moisture Limit, TML),即规定货物实际水分含量大于测得的 TML 值,将不允许运输。安全委员会(MSC)制定的《固体散货安全操作规则》中叙述了三种矿粉 FMP 的检测方法,分别为流盘试验法(Flow Table Test)、针入度试验法(Penetration Test)及卢梭饱和度试验法(Proctor/Fagerberg Test)^④。

1. 流盘试验法

流盘试验法是由日本提出的利用流盘测定易流态化货物的流动水分点(见图 1.3)。当流动状态发生时,取两个样品来决定 FMP。一个样品的水分含量恰好稍大于 FMP,另一个样

①IMSBC Code. International maritime solid bulk cargoes code [S]. International Maritime Organization, 2009.

②傅延忠. 关于危险货物运输的法律问题 [J]. 世界海运, 1997 (3): 53—55.

③交通部. 海运精选矿粉及含水矿产品安全管理暂行规定 [Z]. 1988.

④Mediterranean Shipping Company S A. Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes [S]. International Maritime Organization, 2004, 79/23/Add 4.

品的水分含量恰好稍低于 FMP。两个数据的差值不大于 0.5%。取两个数值的平均数作为 FMP。考虑安全系数, TML 被定义为 FMP 的 90% (或 85%, 取决于货物的堆积密度)。

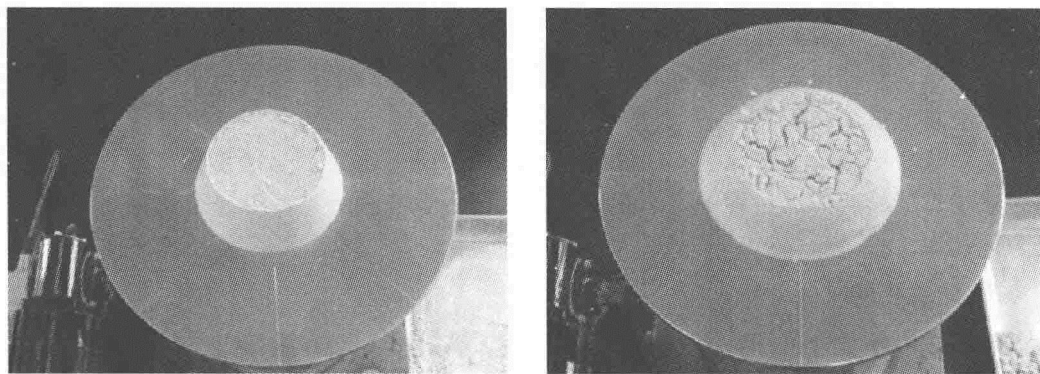


图 1.3 流动状态发生形变之前后样品状态的比较

流盘试验一般适用于最大粒度为 1 mm 的精矿或其他颗粒物质, 而对于黏粒含量较高的物质, 试验结果不理想, 同时由于该方法中许多步骤都是通过手工完成的, 所以得到的结果精度不高, 尤其是捣实步骤。因为操作人员的不同直接影响实际捣实的效果, 即使是同样的试样捣实中, 流动水分点的差距也可能达到 1%, 该方法产生误差的另一原因是流动水分点并不是通过定量方法得到的, 而是目测得到的。

2. 针入度试验法

针入度试验法是利用渗透式或沉降式测量仪来测定易流态化货物的流动水分点, 然后取其 90% 作为该货物的流动水分限量。针入度试验在振动时间, 振动频率和探针渗入货样表面等方面都有明确的量化标准, 不过, 其捣实步骤同样是人工来完成的, 所以误差也较大, 同时, 沉降试验所使用的设备也比较复杂。

针入度试验法一般适用于精矿及最大颗粒为 25 mm 的类似的物质。在日本普遍使用针入度法又叫渗透法, 其判别标志是当振动 6 min 后, 探针渗入固体货物表面超过 50 mm, 则认为试样发生流态化。

3. 饱和度试验法

卢梭饱和度试验是丹麦提出的葡式/樊式测量仪来测定易流态化货物的饱和含水量, 然后取其 70% 作为货物的适运水分限量。卢梭饱和度试验一般适用与细粒和粗粒精矿或最大颗粒为 5 mm 的类似物质的试验, 但不适用与煤或其他多孔物质, 卢梭饱和度试验法的捣实步骤则是通过导管下落的小锤来实现的, 捣实压力恒定。这种方法可以直接求取适运水分限, 而不是通过流动水分点换算得到, 但是该方法需多次试验, 计算, 作图也比较繁琐。在目前国内外相关实验数据积累不多, 缺乏其他实验室的流盘试验数据的情况下, 常常采用饱和度法进行比对实验, 以确保试验数据的合理和准确。

国内外目前对精粉矿流态化的试验研究也大都基于以上三种试验方法, 讨论散装矿产品适运水分限量 TML 的检测方法、试验仪器或者判别标准, 而对于影响流态化的内外因素以及各因素的敏感程度尚未涉及。

1.2.2.2 安全运输及预防措施

另一方面,对防止精粉矿在运输过程中流态化发生的研究,主要集中在安全监督管理、防止危害发生的经验管理及安全措施等方面,这些举措主要包括:保证船舶适货及适航;合理堆载、严格把关;审查堆场环境;认真计算船舶稳定;埋桶积水;开航前及航行中安检;应急演练。

然而,这些措施都是依靠一些经验实施的,缺少明确的数字化预警和急救系统,这主要因为缺少对精粉矿海运过程中流态化现象的工程力学特性研究,对流态化现象产生机理缺乏合理认识。

1.2.2.3 流态化的其他分析

近年来国内外学者也开始探索一些新的研究方法,从不同方面来对精粉矿流态化的机理进行揭示,这主要包括:在已有试验基础上,利用数据挖掘技术进行建模分析,应用统计方法确定最佳的 TML 预测方法;利用各种试验研究方法,讨论含水率、渗透性、压实度、保水性、级配等各种因素对精粉矿流态化规律的影响;利用一些较新的试验和理论手段,尝试从细观或微观上揭示精粉矿流态化的机理。

这些研究都对精粉矿流态化规律做了一定程度的揭示,但是关于精粉矿发生流态化的机理仍然不明确,国内外仍然没有形成统一的共识。总的来说,关于精粉矿流态化机理的研究尚处在探索研究阶段,仍需要进行深入的基础性研究。

1.3 与精粉矿安全运输相关的法规文件

载运精粉矿等易流态化货物连续发生重大的海损事故,引起了国际船级社协会(International Association of Classification Societies, IACS)、国际海事组(IMO)以及国际国内各有关部门的高度重视,促使各有关部门先后修订或者制定了一系列相关法律法规和指导意见^{①②③④⑤}。

1.3.1 国际海事组织(IMO)

(1) 1997 年 IMO 第 20 届大会上,在 SOLAS 公约中新增了第十二章:“散装货船的附加安全措施”,并于 1999 年 7 月正式生效。公约新增条目中明确了关注船体结构、分舱稳性、货舱检查、装载仪配备和货物密度申报等方面的要求。

(2) IMO A862 (20) 号决议《散装货物船舶安全操作规则》(BLU Code)和 MSC238 (82) 号修正案针对散货装卸作业的管理做了详尽的描述。BLU Code 主要根据码头和船舶的适用性、到港之前船舶和码头的工作程序、货物装卸前船舶和码头之间的工作程序、货物装载和压载的处理以及货物卸船和压载处理几方面向船东、船员、托运人、租船人和码头工作

^①Claes Lsacson. Indonesia and the Philippines — Safe Carriage of Nickel Ore Cargoes International Group Member No. 23/2010.

^②Dr Martin Jonas, Brookes Bell. Liquefaction of unprocessed mineral ores—Iron ore ines and nickel ore . Liverpool.

^③Ken Grant of Minton. Treharne & Davies Nicholas Crouch Martin Jonas. Carriage of nickel ore North of England P&I Association.

^④Chris Spencer& David Tikley. BULK CARGO LIQUEFACTION (IRON ORE FINES AND NICKEL ORE) STANDARD CARGO.

^⑤Australian transport safety bureau. MARINE SAFETY INVESTIGATION REPORT 148 , 2000.

人员针对安全搬运、固体散装货物的装卸提供理论指导,并且明确了各方面人员的责任。

(3) IMO A. 866 (20) 号决议《船员和码头人员对散装货船的检查指南》(the Guidance to Ships' Crews and Terminal Personnel for Bulk Carrier Inspections) 主要提供了对散装货船的甲板、货舱等的船体结构,包括裂纹、腐蚀、变形以及其他船舶损坏进行指导和检查。

(4) IMO 所列的 BC 规则——《固体散装货物安全操作规则》于 1965 年出版,并经 1985 年、1994 年、2008 年和 2010 年 4 次修改,最新规则更名为 IMSBC 规则(《国际海运固体散装货物规则》),并于 2011 年 1 月 1 日执行。IMSBC 规则目前已成为国际海上散装镍矿粉安全装运的最新国际法律法规的依据和生产实践的指导性文件。

(5) 2012 年 03 月,法国向 IMO 提出了一份研究报告,提出将镍矿(Nickel Ore)列入 IMSBC 规则 A 组货物,但不能利用现有的流动水分点测量仪测定其流动水分点,法国在研制了一种专用于测量镍矿流动水分点的新式测量仪。

1.3.2 国际船级社协会(IACS)

(1) 国际船级社协会于 1992 年制定了新的统一要求(Unified Requirement, URs)。

(2) 针对散装货物船舶事故较多的现状,IACS 从 1993 年 7 月 1 日起在 IACS 内部全部启动实行加强检验计划 ESP(Enhanced Survey Program)。因为检验范围的扩大,有效地减缓了船舶结构腐蚀的速度,有助于及时发现裂纹和局部失效等缺陷,使船员能够提前做好预防的措施。该计划在 IMO 被采纳为 A744 (18) 号决议,作为新的检验新规定纳入到 SOLAS 公约第 XI 章中予以强制执行。

(3) IACS 出版《避免船体结构过应力的散货装载和卸载操作指导性文件》(Guidance and Information on bulk Cargo Loading and Discharging to Reduce the Likelihood of Over Stressing the Hull Structure)。

(4) IACS 出版《散装货船船体结构检验、评估和维修指南》(《Bulk Carrier — Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of hull Structure》),为散货船的船体结构检验、评估和维修提供指导。

1.3.3 中国船级社(CCS)

中国船级社全面实行 IMO 和 IACS 对于散货船安全的有关要求。

1.3.4 中华人民共和国交通运输部

我国交通部海事局下发一系列文件规范海水矿石、矿粉的安全运输,主要包括:

(1) 《海运精矿粉及海水矿产品安全管理暂行规定》(交海字【1988】275 号)

(2) 《关于海运生铁、金属块锭、盘元、煤炭、散盐、矿石、矿砂、矿粉等散货装舱标准和船舶、港口责任划分的规定》(交海字【1987】261 号)

(3) 《关于执行〈国际海运固体散装货物规则〉有关事项的通知》(海船舶【2010】662 号)

(4) 《海运精选矿粉及含水矿产品安全检验方法》(交运字【1989】198 号)

(5) 《关于加强装运陶土船舶安全监管的通知》(交通运输部广州海事局)

(6) 《船舶载运散装液体物质分类评估管理方法》(海船舶【2007】239 号)

(7) 《水路运输易流态化固体散装货物安全管理规定》(交水发【2011】638 号)需要指出的是,《水路运输易流态化固体散装货物安全管理规定》共 28 条,自 2011 年 11 月 9 日起施行。于此同时,上面提到的(1)《海运精矿粉及海水矿产品安全管理暂行规定》

（交海字【1988】275号）和（4）《海运精选矿粉及含水矿产品安全检验方法》（交运字【1989】198号）予以废止。

作为 IMO 规范和公约的缔约国，我国在全面贯彻并认真履行上述法规的同时，还要在执行过程中不断完善，切实解决我国散货运输的实际问题。