

DOI: 10.11779/CJGE201408018

红土镍矿流态化特性的模型试验研究

周 健^{1, 2}, 朱耀民¹, 简琦薇¹, 贾敏才^{1, 2}, 金允龙³

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 上海船舶运输科学研究所, 上海, 200135)

摘 要: 通过室内小型振动台模型试验, 对船载红土镍矿的流态化特性进行了研究。基于数字图像采集和分析, 揭示了红土镍矿流态化的演化过程。分析了含水率、加速度等因素对红土镍矿流态化特性的影响以及孔隙水压力和含水率在流态化过程中的变化规律。试验结果表明: 水分迁移是造成红土镍矿形成流态化的主要原因; 含水率是影响红土镍矿流态化发生的关键因素, 建议实际运输中控制与本研究相同的红土镍矿含水率在 31.0% 以下; 加速度大于某一临界值时, 加速度对红土镍矿流态化特性才有较大影响。研究对减少红土镍矿在船运过程中流态化风险有重要的意义。

关键词: 流态化; 小型振动台试验; 红土镍矿

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)08-1515-06

作者简介: 周 健(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学、岩土地震工程、土体细观力学性质试验与数值模拟等方面的教学与研究工作。E-mail: tjuzi@vip.163.com。

Model tests on fluidization characteristics of laterite nickel ore in bulk

ZHOU Jian^{1, 2}, ZHU Yao-min¹, JIAN Qi-wei¹, JIA Min-cai^{1, 2}, JIN Yun-long³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Ship & Shipping Research Institute, Shanghai 200135, China)

Abstract: By means of shaking table tests, the fluidization characteristics of laterite nickel ore in bulk under dynamic loading are investigated. With the help of digital image capture and processing technology, the phenomenon of fluidization evolution is revealed. The effect of different influencing factors such as moisture content, acceleration and the change law of pore water pressure and moisture content in the process of fluidization are analyzed. The test results show that the moisture migration is the main cause for fluidization of laterite nickel ore. The fluidization of laterite nickel ore is mostly influenced by the moisture content, and it is suggested that the moisture content of laterite nickel ore used in the test should be below 31.0% in practical transport. Only when the acceleration is greater than a certain critical value, the acceleration has great influence on the fluidization characteristics of laterite nickel ore. This study is of important significance in reducing risk for laterite nickel ore in the shipping process.

Key words: fluidization; shaking table test; laterite nickel ore

0 引 言

在运输镍矿时, 通常将镍矿作为《IMSBC 规则》^[1]中所规定的 A 类货物进行运输和管理。这是因为红土镍矿在海运途中往往因含水率过高, 在波浪荷载作用下易产生流态破坏现象, 进而引发沉船事故, 其货物特性完全符合《IMSBC 规则》中 A 类货物的特征。镍矿的安全运输已成为航运界密切关注的焦点和热点^[2-4]。

流态化是指船舶运输过程中遇到风浪产生摇摆和振动, 甚至仅由于船舶振动, 使得矿粉发生水分渗出矿体表面, 形成自由液面的现象。镍矿发生流态化后, 流动性和流速度加大, 造成货物流向一舷, 船舶稳定

性降低, 导致船舶倾覆^[5-7]。国内外对镍矿流态化的研究主要集中在两个方面: ①测定镍矿的流动水分点(发生流态化现象的临界含水率), 如《IMSBC 规则》中建议采用流盘试验法、沉降试验法和葡式/樊氏试验法来测定镍矿的流动水分点。但由于镍矿未被加工, 颗粒不均匀, 用上述方法测得的流动水分点和适运含水率(一般为流动水分点的 90%), 只具有参考性, 而不能完全保证运输安全。②对运输镍矿发生沉船事故的原因、危害及安全措施等经验控制^[7-8], 而工程力学

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB723804)

收稿日期: 2013-11-22

应用于精粉矿海运过程的研究很少。

Gallagher 等针对矿物属性如粒度分布、相对密度、颗粒尺寸、剪切强度与适运含水率进行关联研究^[9]；欧义芳^[10]和唐星球等^[11]对易流态化货物发生流态化的机理进行了初步的探索，但是对红土镍矿流态化机理的解释不甚明确并缺乏相关试验的验证。

本文通过室内小型振动台试验，研究船运红土镍矿的流态化演化历程，分析含水率、加速度等因素对镍矿流态化特性的影响，确定影响镍矿流态化的关键因素，并提出镍矿适运含水率的建议值。

1 室内模型试验

1.1 室内模型试验装置

(1) 室内小型振动台模型

船舶在海浪作用下的运动具有随机性^[12]，若假定海浪是规则和稳定的，那么船舶在海浪作用下的运动可认为有简谐运动组成，这将给分析研究带来方便，且研究结果同样具有参考价值^[13]。本文研究镍矿在简谐水平循环荷载作用下的情况。

本试验利用课题组自主研发的室内小型振动台，来模拟载运过程中船舶受到波浪作用的水平横摇。振动台是水平单向往复振动的，可根据需要调节运动的频率和振幅。振动台主要采用曲柄滑块机构提供振动相应的速度和加速度^[14]。

试验中基底加速度值与振动频率、模型箱基底振幅相关。当设计频率为 1 Hz 时，与模型箱基底振幅为 24, 44, 63, 82, 99 mm 时，相应加速度为 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g, 0.5g。

(2) 量测装置与数据采集

数据采集设备由数字图像采集、孔隙水压力采集等部分构成。数字图像采集采用 Canon NEX5 数码微单连续记录模型变化；试验中利用江苏联能电子有限公司生产的 YE6230T01 高速动态数据采集仪和 YEC-DASP 数据采集与分析系统进行孔压的数据采集和分析；孔压传感器是英国德鲁克公司生产的 PDCR81 孔隙水压力传感器，最大量程为 100 kPa，精度等级 0.2%，输入电压为 5 V，精确测量镍矿内部孔压变化。图 1 为孔压测点布置图。

在试验前后，保持孔压传感器距模型底部的高度与矿体总高度的比值相等。为解决孔压传感器的“零点”漂移问题，在每次试验前后都进行孔压标定，以保证测试数据的可靠性和稳定性。

1.2 试验材料

试验所使用的红土镍矿由上海船舶运输科学研究所提供。镍矿的物理性质指标：塑限 w_p 为 45.01%，

液限 w_L 为 60.02%，塑性指数 I_p 为 15.01，重度为 16.0 kN/m³，干重度为 13.17 kN/m³，土粒比重为 2.75。

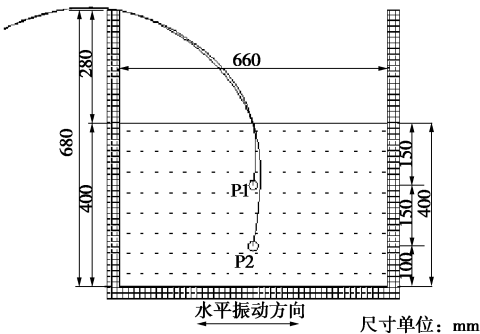


图 1 孔压测点布置图

Fig. 1 Layout pore-pressure measuring points

试验用镍矿的颗粒级配曲线见图 2。试样颗粒属于粉质黏土范畴。

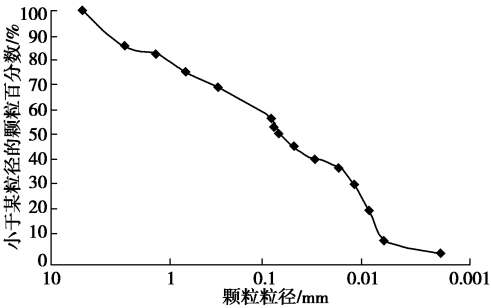


图 2 试验用镍矿的颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curve of nickel ore in experiment

1.3 室内模型试验设计

(1) 模型相似比

本试验的主旨在于探究船载镍矿流态化发生发展的演化过程以及各因素对流态化特性的影响，因此确定模型相似比例时，考虑重力加速度 g 的近似模拟，因此质量密度相似系数为 1；试验中镍矿模型长度为 66 cm，宽度为 32 cm，高度为 40 cm，几何比例为 1：25，模拟 5.7 万吨级散货船各舱均匀装载情况；此外，对于镍矿来说，由于其材料的特殊性和不可替代性，在模拟振动台上模型完全满足相似律是不可能。在以上原则的基础上，基于 π 定理，采用量纲分析法，导出模型试验其它物理量的相似系数见表 1 所示。

表 1 模型相似关系及其相似比

Table 1 Similarity relations and ratios of model

类型	物理量	量纲	相似关系	相似比
几何特征	长度 l	L	C_l	1/25
	位移 r	L	$C_r=C_l$	1/25
材料特征	重力加速度 g	LT^{-2}	C_g	1
	密度 ρ	ML^{-3}	C_ρ	1
	动孔压 u	$ML^{-1}T^{-2}$	$C_u=C_l$	1/25
	振动持时 T	T	$C_T=C_l^{1/2}$	1/5
动力特征	振动频率 ω	T^{-1}	$C_\omega=1/C_T$	5
	振动加速度 A	LT^{-2}	C_A	1
	响应加速度 a	LT^{-2}	C_a	1

(2) 模型试验方案

本试验方案, 如表 2 所示, 以含水率和加速度作为主要控制因素进行设计。根据上海船舶运输科学研究所提供的资料显示, 波浪谱的特征频率一般在 0.1~0.2 Hz, 考虑模型相似比, 试验设计频率为 1 Hz。镍矿含水率分别取 30%, 33%, 35%, 36%, 37% (国际海运中的含水率通常指水的质量与总矿质量之百分比)。根据上海船舶运输科学研究所提供的实测数据, 均匀装载时, 舱底、矿砂重心处横向加速度在 0.15g~0.37g 之间, 因此试验中控制最大加速度为 0.4g。

表 2 模型试验方案

Table 2 Model test schemes				
试验编号	含水率 /%	加速度 /g	是否流态化	备注
#1	30	0.4	否	出现大裂缝
#2	33	0.3	否	出现大裂缝
#3	33	0.4	是	成泥浆状
#4	35	0.2	否	出现裂缝
#5	35	0.3	是	成泥浆状
#6	36	0.2	否	出现裂缝
#7	36	0.3	是	完全流态化
#8	37	0.1	是	完全流态化

1.4 模型试验过程

试样的制备采用分层湿捣法, 均匀配置镍矿试样, 分 10 层进行, 控制每层试样的干密度基本保持在同一数值, 各层接触面刮毛以保证上下接触良好。试样制备完成后镍矿表面铺设湿毛巾, 并静置 1 h 使镍矿的含水率保持充分均匀。

在所有准备工作完成后, 开启数据采集设备, 开启振动台电源, 施加振动荷载。试验最大振动周数为 1200 次, 当试验中发生明显流态化破坏现象后即停止振动台振动。

试验后, 取模型不同位置处的镍矿进行含水率的测量, 以检查不同位置处镍矿在振动前后含水率是否发生改变。取土位置为模型宽度的中部, 沿图 3 中的左、中、右线从上表面向下每隔 5 cm 取土样, 测量该点位置处的含水率。

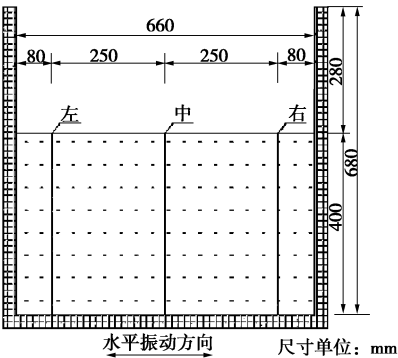


图 3 测量含水率的取土位置

Fig. 3 Position of soil sampling for moisture content

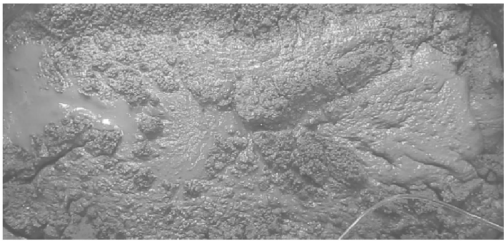
2 模型试验结果分析

#1~#8 试验中共有 4 组试验产生流态化现象。当含水率为 30% 时, 镍矿没有发生流态化; 含水率为 33% 在加速度为 0.4g 时才发生流态化; 含水率为 35%、36% 的镍矿在加速度大于等于 0.3g 时均发生流态化; 而含水率为 37% 的镍矿在加速度为 0.1g 时即发生流态化。

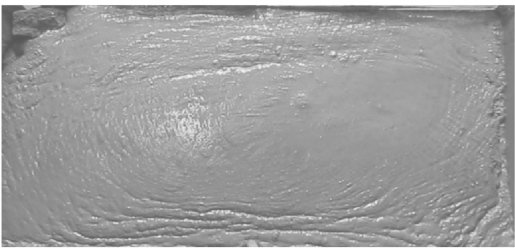
2.1 镍矿流态化分类

根据试验后镍矿流态化的状态, 可分为成泥浆状镍矿和完全流态化镍矿。

成泥浆状镍矿, 如图 4 (a) 所示, 在试验#3、#5 试验后, 镍矿发生了部分流态化, 泥浆从表面裂缝中渗出, 形成了密度不均匀的混合物。



(a) 成泥浆状镍矿



(b) 完全流态化镍矿

图 4 镍矿流态化的状态

Fig. 4 States of nickel ore after fluidization

完全流态化镍矿, 如图 4 (b) 所示, 在试验#7、#8 试验后, 镍矿发生完全流态化, 上层镍矿变成了黏性的流体。

2.2 红土镍矿流态化的宏观现象

根据模型侧面和上表面记录到的不同时刻的试验现象, 来研究镍矿发生流态化的过程。

(1) 模型侧面现象

图 5 是#7 试验镍矿流态化过程正视图。从图 5 可以看出, 首先出现了竖向裂缝 (见图 5 (b)), 随着振次的增大, 出现更多的竖向裂缝, 并出现一条水平大裂缝 (见图 5 (c)), 水平裂缝上部的镍矿发生明显的往复的运动, 下部的镍矿成泥浆状, 最终在 600 振次左右时, 镍矿完全流态化, 泥浆成波浪状运动 (见图 5 (d))。

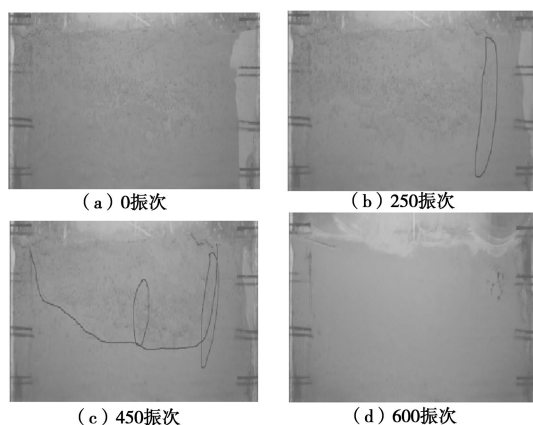


图 5 #7 镍矿流态化过程正视图

Fig. 5 Front view of fluidization of model

(2) 模型上表面现象

图 6 是 #7 试验镍矿流态化过程俯视图。从图 6 可以看出, 在 250 振次时, 矿粉上表面没有发生明显变化, 在 450 振次时, 上表面出现裂缝, 中部矿体有明显的竖向位移, 并从裂缝中渗出少量泥浆 (见图 6 (c)), 裂缝和泥浆随振次增大而增多, 最终泥浆成波浪状运动 (见图 6 (d)), 镍矿完全流态化。

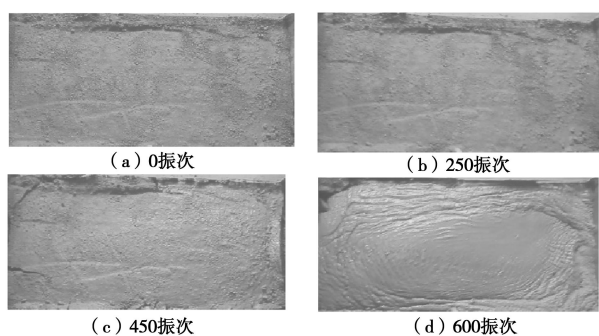


图 6 #7 镍矿流态化过程俯视图

Fig. 6 Top view of fluidization of model

结合模型侧面和上表面的试验现象, 可知下部镍矿先发生流态化, 流态化范围逐渐向上部发展, 最终镍矿完全流态化。

2.3 孔隙水压力发展规律

图 7 是镍矿模型试验中测点 P1 和 P2 的孔隙水压力变化曲线。当含水率 30% 加速度 0.4g 时, 见图 7(a), P2 处初始孔压增长较 P1 处快, 当约在 600 振次时, P2 处孔压会发生突降, 这是由于在动荷载作用下, 下部镍矿先发生流态化, 矿体在较大的孔压作用下, 内部出现裂缝, P2 处自由水沿裂缝向其他位置渗透, 孔压发生消散。P1 处孔隙水压力仍继续增长, 最终两处孔压将分别趋向于稳定值, 镍矿未发生流态化; 试验 #2, #4, #6 等的孔压规律与试验 #1 相似, 试验 #2 中 P2 处孔压未发生突降, 是由于加速度较小, 而试样含水率较低抗剪强度较高, 矿体内部未发生裂缝; 对于发生流态化的试验, 在一定振动周次后 P2 处孔隙水压

力开始逐渐减小 (试验 #7 在 250 振次), P1 处孔压持续增大, 当上部镍矿发生流态化后 (试验 #7 在 600 次左右), P1 孔隙水压力也略有减小。超孔压未完全消散, 是由于镍矿渗透系数较小, 振动刚结束的时候, 超孔隙水压力未完全消散, 而为了取样测量振动刚结束时不同位置处镍矿的含水率, 只好放弃振动结束后孔隙水压力的采集。

需要注意的是, 本文主要研究水分迁移和含水率的影响, 对孔隙水压力的测试不够精细。文中近似把土样看成是饱和土, 采用一般孔隙水压力计测试孔隙水压力, 所测得的孔隙水压力值实际上是孔隙气和水压力值的总和。在非饱和样到流态化发生之间过程中, 所测孔隙水压力的误差值从大变小。在接近流态化时, 所测的孔隙水压力值应该比较接近实际的。

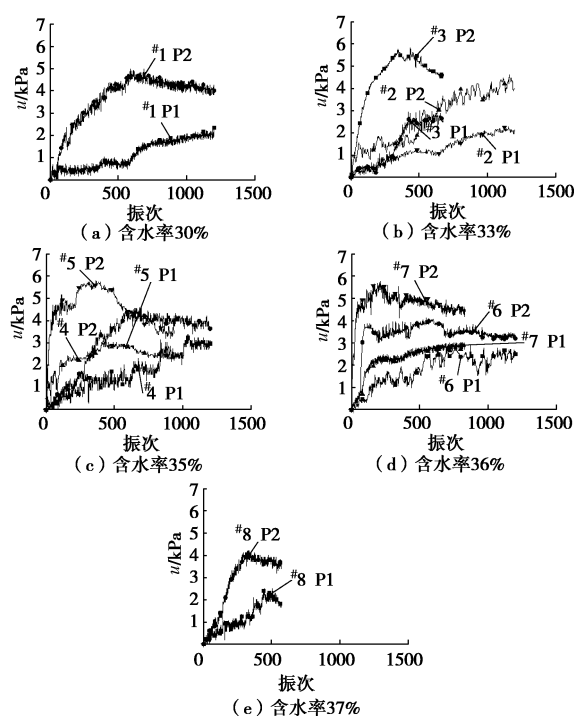


图 7 镍矿模型试验的孔压曲线

Fig. 7 Pore-pressure curves of model tests

2.4 不同位置处含水率变化规律

图 8 (a) ~ (e) 分别是试验 #1, #3, #5, #7, #8 振动停止后的不同位置处的含水率沿模型高度方向的变化情况。横坐标为含水率值, 纵坐标表示测点位置离上表面的距离。图 8 (f) 为实际航运中, 进港后从船舱不同位置处取样测得的镍矿含水率^[4], 船舱中的镍矿已发生流态化。

从图 8 中可以看出, 动荷载作用后, 模型试验与实际运输中含水率随深度变化曲线相似, 说明本试验能很好地模拟实际中镍矿流态化的过程。比较 8 (a) ~ (e) 可以发现, 试验 #1 镍矿未发生流态化, 不同位

置处镍矿含水率与试样含水率相差不大; 试验#3, #5 镍矿发生部分流态化, 含水率在上表面和模型底部含水率超过试样含水率, 中间部分总体上含水率低于试样含水率; #7, #8 镍矿发生完全流态化, 规律与未完全流态化试验的曲线相似, 只是在上表面处镍矿的含水率更高, 超过镍矿的液限。结合镍矿流态化的宏观现象, 可知在动力荷载作用下, 镍矿中水分发生了迁移, 开始时, 镍矿水分向下迁移; 由于模型底密封性较好, 当下部孔压达到较大值后, 最终水分向上迁移, 导致出现上表面和模型底部的镍矿含水率较高的现象。

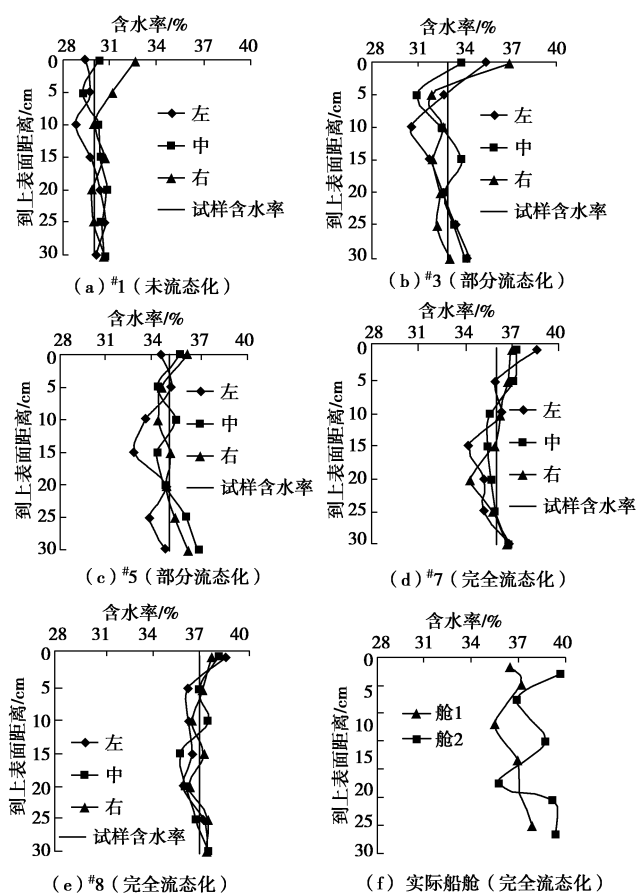


图8 不同位置处镍矿的含水率

Fig. 8 Moisture contents at different locations after tests

2.5 影响镍矿流态化的因素

从表1可以看出含水率和加速度均对镍矿流态化有一定影响, 下面将分别讨论这两种因素对镍矿发生流态化的影响程度。

(1) 含水率对镍矿流态化特性的影响

从表1可知, 当加速度为 $0.3g$ 时, 含水率低于33%的镍矿难以发生流态化, 而含水率分别为35%和36%的镍矿发生了部分和完全流态化。另外对于含水率为37%的镍矿, 在加速度为只有 $0.1g$ 时就发生了完全流态化。由此可以看出, 含水率对镍矿流态化特性的影

响至关重要, 而且当含水率低于某一临界值时, 镍矿将难以发生流态化现象。

(2) 加速度对镍矿流态化特性的影响

从表1可知, 无论镍矿含水率高还是低, 都存在一个加速度临界值, 当加速度大于此值时, 镍矿在一定振动周次后发生流态化, 而小于此值时, 试样很难发生流态化。含水率为33%时, 在 $0.3g$ 时未发生流态化, 当加速度为 $0.4g$ 时, 镍矿发生部分流态化; 含水率为35%、36%时, 在加速度 $0.2g$ 作用下, 镍矿未发生流态化, 在 $0.3g$ 发生流态化。这说明镍矿发生流态化过程中需要外界提供足够的能量, 当加速度小于某一临界值时, 加速度几乎对红土镍矿流态化特性无影响。

根据上海船舶运输科学研究所提供的实测数据, 均匀装载时, 舱底、矿砂重心处横向加速度在 $0.15g \sim 0.37g$ 之间。在加速度为 $0.3g$ 时, 实测镍矿模型箱底部、重心处最大加速度为 $0.38g$, 故可取35%作为该镍矿的界限含水率, 适运含水率可取为31.5%, 考虑到实际航运过程中镍矿所受荷载的复杂性, 建议在实际运输中, 应控制该红土镍矿的含水率低于31.0%。

3 结 论

本文通过模型试验, 揭示了海运红土镍矿在动荷载作用下流态化的演化过程, 分析了含水率、加速度等因素对镍矿流态化特性的影响, 并提出镍矿适运含水率的建议值。

(1) 水分迁移是造成红土镍矿形成流态化的主要原因。在动荷载作用下, 镍矿有振密效应, 颗粒间孔隙变小, 同时振动作用使镍矿中水分向下迁移。当下部水分积累到一定程度后, 水分又开始向上迁移。另外镍矿在振动作用下内部出现的裂缝加快了水分向上迁移。随着水分向上迁移, 镍矿上部孔隙水压力增大, 达到一定值后, 镍矿变成黏性流体, 发生流态化现象。

(2) 含水率是影响镍矿流态化发生的关键因素。当含水率较大时, 即使加速度较小, 镍矿也可能发生流态化。但当含水率低于某一含水率时, 即使加速度较大, 镍矿也不易发生流态化。

(3) 当加速度小于某一临界值时, 加速度对镍矿动流态化特性影响有限。当模型箱加速度不大于 $0.3g$ 时, 含水率低于33%的红土镍矿难以发生流态化。

(4) 考虑实际航运中天气等不可测因素, 建议控制与本试验相同的红土镍矿含水率在31.0%以下。

参考文献:

- [1] The international maritime solid bulk cargoes code[S]. 2009.

- [2] 王祎博. 船载镍矿的安全运输技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012. (WANG Yi-bo. Research on the safe shipment technology of nickel ore[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. (in Chinese))
- [3] 王洪亮, 董庆如. 船舶载运易流态化货物的风险和对策[J]. 中国航海, 2011, **34**(2): 101 - 104. (WANG Hong-liang, DONG Qing-ru. The risks of the ship carrying cargoes that may liquefy and countermeasures to be taken[J]. China Maritime Safety, 2011, **34**(2): 101 - 104. (in Chinese))
- [4] 雷海. 红土镍矿粉的安全运输[J]. 航海技术, 2011(1): 27 - 28. (LEI Hai. Transportation safety for laterite nickel ore [J]. Marine Technology, 2011(1): 27 - 28. (in Chinese))
- [5] SHEN Jiang. Nickel ore and its safe shipment[J]. Advances In Chemical Engineering, Advanced Materials Research, 2011: 396 - 398; 2183 - 2187.
- [6] MSC 79/23/Add.4. Code of Safe Practice for Solid Bulk Cargoes[S]. 2004.
- [7] 黄志. 船舶载运精矿粉的安全措施探讨[J]. 航海技术, 2012(3): 24 - 26. (HUANG Zhi. Study on safety measures of vessels carrying ore[J]. Marine Technology, 2012(3): 24 - 26. (in Chinese))
- [8] 孝建伟. 精矿粉安全装运研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011. (XIAO Jian-wei. Study on safety loading and transportation of Concentrate[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese))
- [9] GALLAGHER B. STOGSDILL S, STEPHENSON R W. Influence of ore physical properties on the transportable moisture limit for barged materials[R]. Washington: Department of Transportation, Washington D C. Research and Special Programs Administration, 2005: 16.
- [10] 欧义芳. 海运易流态化货物安全技术初探[J]. 世界海运, 2012, **35**(2): 15 - 18. (OU Yi-fang. Initial investigation on safety technology for shipping liquefiable cargoes [J]. World Shipping, 2012, **35**(2): 15 - 18. (in Chinese))
- [11] 唐星球. 易流态化货物特性研究及其对运输的影响[D]. 大连: 大连海事大学, 2000. (TANG Xing-qiu. Study on safety loading and transportation of Concentrate[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2000. (in Chinese))
- [12] GABRIELE Bulian, ALBERTO Francescutto, CLAUDIO Lugni. On the nonlinear modeling of parametric rolling in regular and irregular waves[J]. International Shipbuilding Progress, 2004, **51**(2): 173 - 203.
- [13] 丁振东. 大型浮吊海浪作用下结构静态性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. (DING Zhen-dong. Study on static and dynamic characteristics of heavy floating crane under the action of sea waves[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010. (in Chinese))
- [14] 赵振平, 王伟. 散装铁矿粉室内模型试验研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2012(5): 695 - 700. (ZHAO Zhen-ping, WANG Wei. Modeling experiments on bulk iron ore powder[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2012(5): 695 - 700. (in Chinese))