

散装铁精矿流态化宏细观机理

周 健^{1,2}, 白彪天¹, 李宁³, 简琦薇¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 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. 上海出入境检验检疫局, 上海 2000135)

摘要: 基于室内小型振动台对散装铁精矿进行动力试验, 研究了散装铁精矿流态化发生的过程和机理。基于数字图像采集和分析系统, 分析了流态化过程中铁精矿位移场、水分迁移以及颗粒运动规律, 从宏细观两方面揭示了散装铁精矿的流态化演化规律。试验结果表明: 铁精矿产生流态化的主要原因是在动力荷载作用下, 铁精矿细颗粒沿着粗颗粒孔隙向下迁移和颗粒表面水落下汇集形成水膜后向上流动。该结论为进一步探究铁精矿的流态化预防措施提供了理论依据。

关键词: 铁精矿; 流态化; 模型试验; 宏细观机制

中图分类号: TU435

文献标志码: A

The Fluidized Macro-Meso Mechanism of Iron Concentrate Ore in Bulk

ZHOU Jian^{1,2}, BAI Biaotian¹, LI Ning³, JIAN Qiwei¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Shanghai 200135, China)

Abstract: The experiments of shaking table tests were carried out in order to study the evolution and mechanism during the fluidization of iron concentrate ore in bulk. And with the use of digital image capture and processing technology, the laws concerning the displacement field, moisture migration and movement of particles during the fluidization were analyzed. As a result of these two types of experiments, both macro and meso mechanism of the fluidization of iron concentrate ore were revealed. The results show that it is the dynamic loading that leads to the fluidization of iron concentrate ore. Due to the dynamic loading, the fine particles move downward through the spaces between coarse particles. At the same time, the water on the surface of particle moves down and becomes water film which

flows upwards. Meanwhile, it provides the theoretical basis for the further studies concerning preventive measures for the fluidization of iron concentrate ore.

Key words: iron concentrate ore; fluidization; model testing; macro-meso mechanism

铁精矿属于国际海事组织颁布的《国际海运固体散货规则》中规定的易流态化危险品^[1]。铁精矿在船运过程中, 当遇到较大风浪时会由于震动发生流态化现象, 引起船体倾斜, 最终导致沉船事故, 造成海上人命、财产损失^[2]。

国际上对铁精矿的研究主要集中在测定其流动水分点(FMP)的三种操作方法上, 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)^[3]; 黄志^[4]和孝建伟^[5]等人对铁精矿在运输中防止流态化的安全措施以及经验控制等进行了研究。欧义芳^[6]通过“比表面积”理论、“相界面”理论和流体力学的“压力势能”原理, 分析了易流态化货物的特性和流态化变化规律; Gallagher 等^[7]讨论了粒子均匀度、粒径、相对密度等可能对 FMP 的产生影响, 但并未做深入的分析; 王伟^[8]通过室内动三轴试验探讨了含水率对铁矿粉的动力特性影响。周健等^[9-10]通过室内振动台试验研究了铁精矿流态化析出水的演化历程, 从宏观角度探讨了不同因素对铁精矿流态化特性的影响, 发现含水率是影响铁精矿流态化的关键因素。

本文基于室内小型振动台试验, 研究散装铁精矿流态化的宏细观特性。通过图像分析程序 Geodog 研究铁精矿流态化的宏观现象和位移场变化; 并从细观角度, 分析铁精矿水分和细颗粒迁移规律; 结合

收稿日期: 2014-04-17

基金项目: 国家公益性基金(201310065)

第一作者: 周健(1957—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土体细观力学和离散元数值分析。

E-mail: tjugezhoujian@tongji.edu.cn

通讯作者: 白彪天(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为非饱和土动力学。E-mail: baibiaotian@163.com

宏观规律,揭示铁精矿流态化的内在机理。

1 室内模型试验

1.1 室内模型试验装置

试验使用自主设计的室内小型振动台,通过模型箱的往复运动来模拟波浪荷载的作用,试验中采用 1 Hz 作为激振频率。铁精矿模型长度为 66 cm,宽度为 32 cm,高度为 40 cm,试验相似比为 1:25,模拟 5.7 万 t 级散货船均匀装舱时的铁精矿堆载高度,表 1 给出了在该相似比下,基于 π 定律得出的其他物理参量的相似比。在铁精矿装箱过程中,高度方向每隔 10 cm 设置一层横向标志砂,并在铁精矿中部设置一层竖向标志砂,铁精矿模型的正面图如图 1 所示。

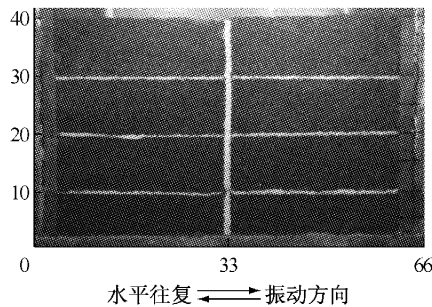


图 1 模型箱正面示意图(单位:cm)

Fig.1 The elevation view of the model (unit: cm)

表 1 模型相似关系及其相似比

Tab.1 The model similarity relationships and their ratios

试验参数		量纲	相似比尺(模型:原型)
基本	线性尺寸	L	1/25
	加速度	$L \cdot T^{-2}$	1
土体	密度	MT^3L^{-4}	1
	颗粒	量纲一	1
	速度	LT^{-1}	1/5
动力	振动时间	T	1/5
特征	振动频率	T^{-1}	5
	动孔压	$ML^{-1}T^{-2}$	1/25

1.2 量测装置与数据采集

数据采集设备由数字图像采集、细观图像采集两部分构成。数字图像采集采用 NEX-5 数码相机录制铁精矿流态化的全程视频;细观图像采集采用日本 JAI 公司生产的型号为 CM-030GE-RA 的高速细观摄像机。

1.3 室内模型试验材料及试验方案

本试验所用铁精矿产自加拿大,由上海出入境检验检疫局提供。试验中采取分层湿捣法均匀配备不同含水率的试样。铁精矿颗粒级配曲线如图 2 所

示,其物理参数见表 2,表中, C_u 为不均匀系数, C_c 为曲率系数, φ 为内摩擦角, ρ_{max} 为最大干密度, ρ_{min} 为最小干密度, D_r 为相对密实度, e_{max} 为最大孔隙率, e_{min} 为最小孔隙率。试样基本物理指标如下:渗透系数 k 为 $5.03 \times 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,颗粒比重 G_s 为 4.95,干密度 ρ_d 为 $2.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^3$,平均粒径 D_{50} 为 0.19 mm,通过对其基本物理性质的比较,可以将铁精矿判别为粉砂。

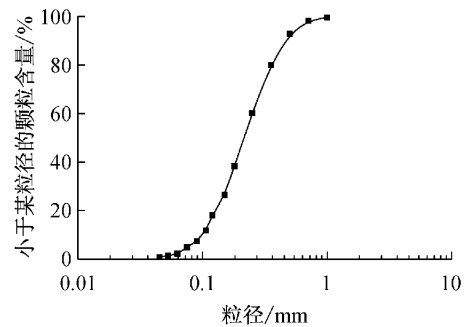


图 2 铁精矿级配曲线

Fig.2 Grain size distribution curve of iron ore concentrate

表 2 铁精矿试样的物理参数

Tab.2 The physical parameters of the samples

C_u	C_c	$\varphi/(^\circ)$	$\frac{\rho_{max}}{(g \cdot cm^{-3})}$	$\frac{\rho_{min}}{(g \cdot cm^{-3})}$	D_r	e_{max}	e_{min}
2.44	1.14	34.5	3.12	2.56	0.33	0.93	0.59

根据上海出入境检验检疫局提供的资料显示,波浪谱的特征频率一般为 0.08~0.15 Hz,本试验考虑较不利情况,根据模型相似比确定设计频率为 1 Hz。同时,监测资料显示铁精矿散货船在载运时,舱内铁精矿的横向加速度幅值范围为 0.16 g~0.42 g (g 为重力加速度),因此,试验中加速度选用 0.3g~0.5g。铁精矿密实度取其天然密实度 0.33。参照前期试验^[9-10],含水率取 9%~10%(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),进行了多组振动台试验,其中发生流态化现象的振动台试验概况见表 3。

表 3 模型试验方案

Tab.3 Model testing schemes

试验编号	含水率/%	加速度/g	密实度	频率/Hz
1	9	0.5	0.33	1
2	10	0.3	0.33	1
3	10	0.4	0.33	1
4	10	0.5	0.33	1

试验采用分层制样,根据设计的干密度及设计的含水率确定每层土样的重量,分 8 层均匀制样,每层击实至要求高度后,将表面刨毛,然后再加第二层

试样,如此进行直至最后一层,并在配置过程中每隔 10 cm 设置横向标志砂,在铁精矿中部设置竖向标志砂,装好土样后,静置 1 h,铁精矿模型表面铺设湿毛巾,使铁精矿内部水分充分均匀,制样完成后,首先开启数字图像采集系统,再施加振动荷载,试验最大振动周数为 600 次。

2 铁精矿流态化试验结果分析

2.1 铁精矿流态化宏观现象分析

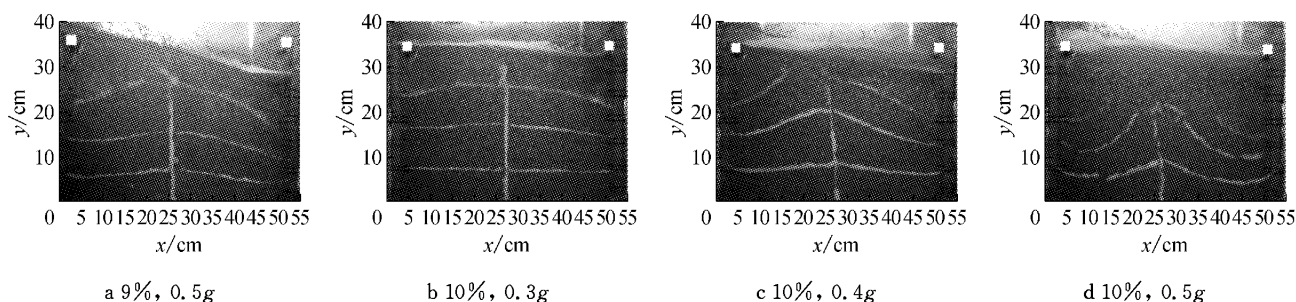


图 3 试验结束时的流态化现象

Fig.3 The fluidized phenomenon at the end of experiments

图 4 为第 3 组试验(含水率 10%,加速度 0.4g)的流态化过程照片。可以看出,试验开始后,水液面首先在铁精矿底部出现,然后迅速上升,并且随着水液面的上升,水液面以下矿体颜色变深,当到 10 振次时,水液面上升到第二层标志砂以上(图 4b),到

90 振次时,水液面上升至矿粉表面(图 4d),到 150 振次时,矿粉表层有水分析出(图 4e),到 300 振次时,矿粉表面形成自由液面,表层不再有水分析出(图 4f),此时,可以认为流态化过程已经完成。同时,试验开始时,表层矿粉首先出现纵裂纹,随着试验的

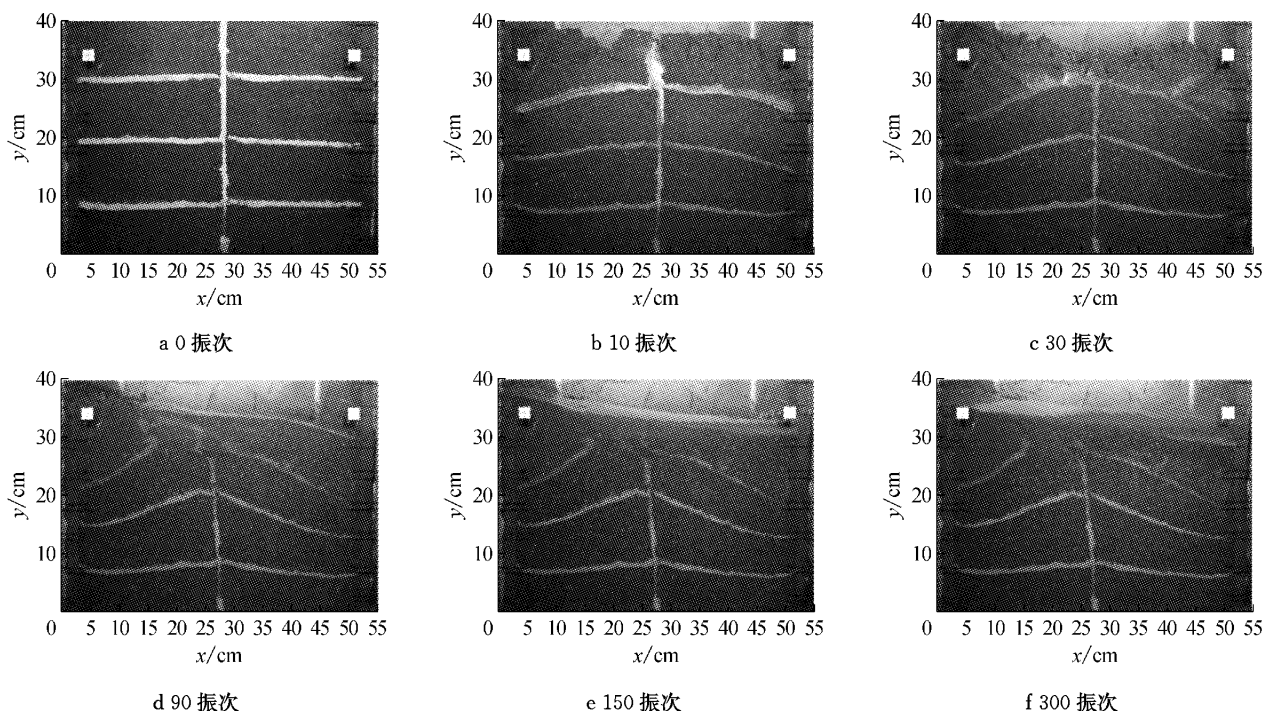


图 4 铁精矿流态化试验现象

Fig.4 The experiment phenomenon of iron ore concentrate

进行,纵裂纹互相贯通,使得上部结构完全破坏;试验过程中,铁精矿发生了明显的分层滑动,滑动面在底部出现并向上移动;试验结束后,标志砂发生明显变形,铁精矿平均沉降为7 cm左右,停止振动一段时间后,铁精矿表层的自由液面仍然存在。

2.2 铁精矿流态化位移分析

2.2.1 铁精矿流态化位移场分析

采用无标点数字图像量测技术对铁精矿模型试验数据进行位移场分析。以下讨论中的位移场均是指铁精矿在某振次结束时与该振次开始时相比的位移场变化,图5为第3组试验(含水率10%,加速度

0.4g)在不同振次时的位移场分布。可以看出,试验开始时,铁精矿产生均匀变形(图5a);当到10振次时,滑动面在铁精矿底部形成,但并不明显;当到30振次时,在铁精矿底部出现了完整的滑动面(图5b),并在右上角出现蓝色区,表明此处开始出现沉降;当到90振次时,滑动面上升到铁精矿中部,下部已基本没有变形(图5c);当到150振次时,只有表层矿粉发生变形(图5d),此时滑动面已经迁移至表层;当到300振次时,只有表层析出的水在晃动(图5e),铁精矿已完全没有变形,铁精矿的流态化过程完成。

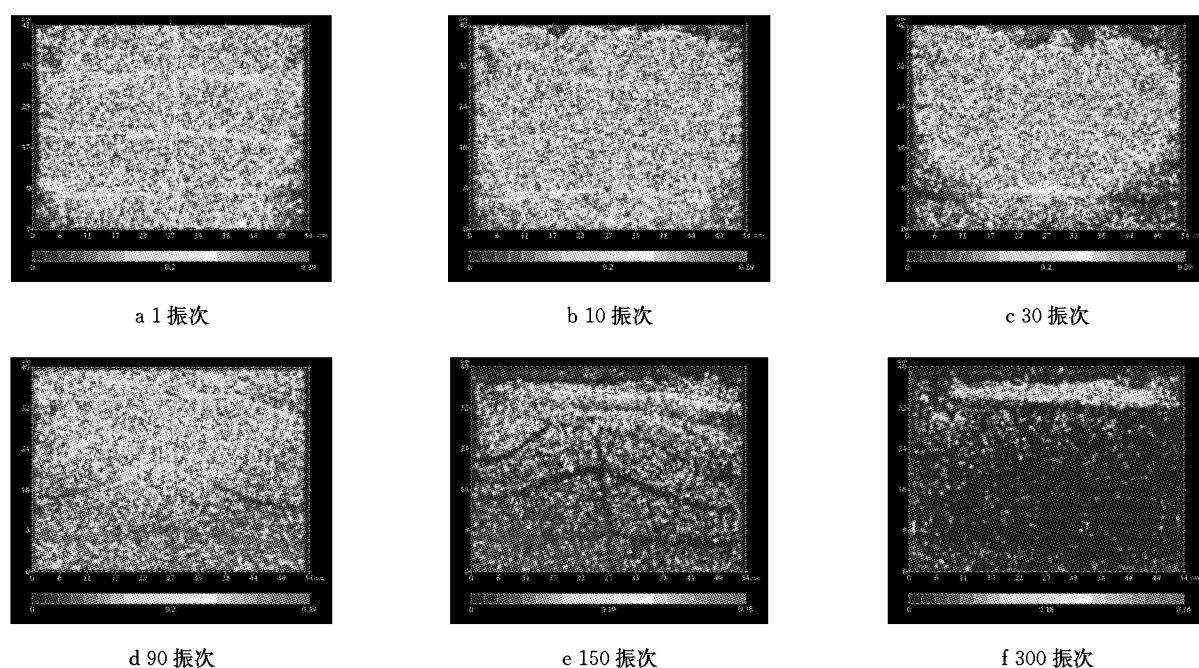


图5 铁精矿位移场分布

Fig.5 The displacement field of iron ore concentrate

从铁精矿的位移场分布来看,铁精矿流态化经历了初始滑动面形成,到滑动面向上迁移,直至最终滑动面消失的过程。

2.2.2 铁精矿流态化标志点位移、速度分析

为了分析铁精矿流态化过程中几个典型位置的位移、速度变化,试验中设置了四道标志砂,将横向标志砂和竖向标志砂之间交点的中点确定为标志点(图6),从底部向上依次为标志点1、2、3,通过数据处理得到这三点的位移、速度时程曲线。需要说明的是,由于后两组试验中100振次以后上层矿粉已完全破坏,因此对后两组试验只分析前100振次中标志点的速度位移时程曲线(图7)。图中, x_1, x_2, x_3 分别为标志点1,2,3的水平位移, v_{x1}, v_{x2}, v_{x3} 分别为标志点1,2,3的水平速度。

比较各组试验中的位移、速度时程曲线,可以看

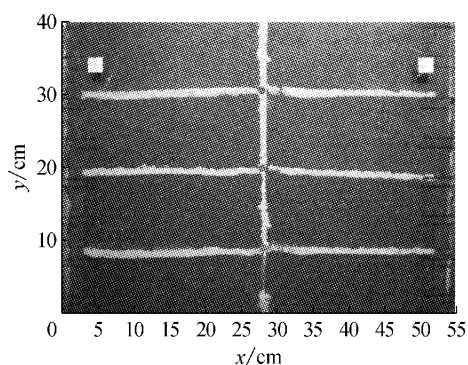


图6 标志点位置示意图

Fig.6 The diagram of mark position

出,三个标志点的运动规律基本一致,均在平衡位置做往复运动。以下将对第三组试验(含水率10%、加速度0.4g)中标志点的运动规律做具体阐述。观察图7c可以发现:试验开始时,三个标志点的运动规

律基本一致,位移的振幅大约在 1 cm 左右,速度的振幅大约在 $0.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$;到 15 振次左右时,标志点 1 的运动幅值开始减小;到 40 振次左右时,标志点 1 的运动幅值趋近于零,同时标志点 2 的运动幅值开始降低;到 75 振次左右,标志点 2 运动幅值趋于零. 通过以上分析可以看出,试验中标志点都是在平衡

位置附近做往复运动,铁精矿流态化过程是从下部首先启动,逐渐向上发展的一个过程. 对比图 7 中的位移时程曲线,水平位移的整体趋势均为向一侧偏移,并且最大位移达到 7 cm(9%, $0.4g$),考虑相似比 1:25,即在实际海运中可以达到 150 cm.

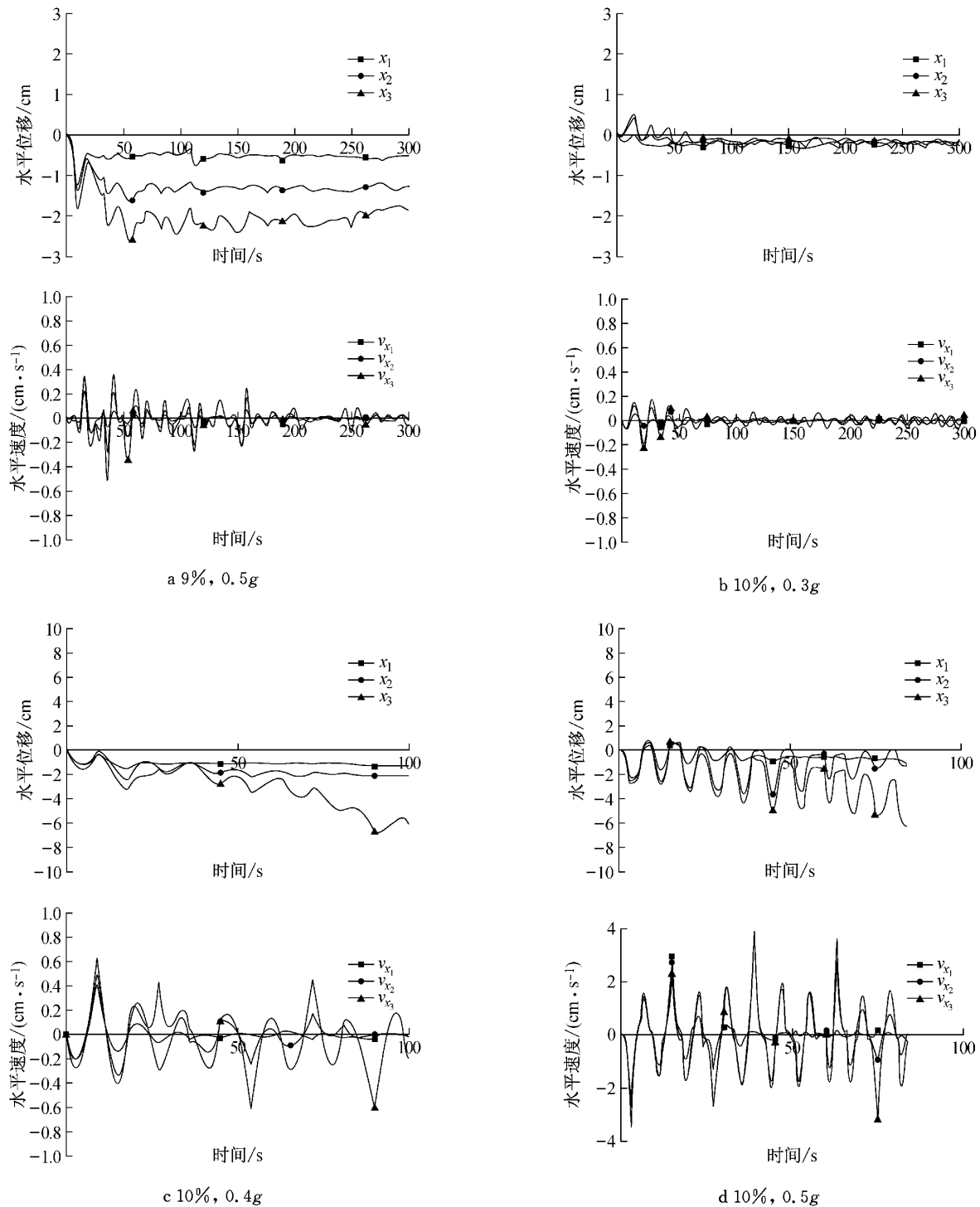


图 7 标志点位移、速度时程曲线

Fig.7 Time history curves of displacement and velocity of mark position

2.3 铁精矿流态化细观机理分析

为研究铁精矿在流态化过程中的细观机理,在模型箱中部,距铁精矿上表面 10 cm、底部 30 cm 处进行细观观测,观测区域面积为 8 mm×6 mm. 通过所获取的数据,分析水分迁移和颗粒组构变化规律.

2.3.1 水分迁移规律

图 8 为第三组试验(含水率 10%,加速度 0.4g)细观变化过程观测照片. 可以看出在试验开始之前,水分是均匀分布在铁精矿内部的孔隙中,并附着于颗粒表面(图 8a);试验开始后,均匀分布的水分在振动力作用下相互聚集,形成包裹颗粒团的较大水膜

(图 8b);在振动力的进一步作用下,水膜相互连通,聚集成水体(图 8c),水液面沿着颗粒间孔隙向上迁移;到 90 振次时,由于水液面上迁移,使铁精矿下部含水率变小,铁精矿不能继续维持完整的水体,只能以水泡的形式向上迁移(图 8d);当到 150 振次的时候,只有残余的少量水分存在于铁精矿之中;当到 300 振次的时候,基本看不到水分的存在,说明此时水分迁移已经完成.

以上分析可以看出,水分的迁移过程主要表现为:铁精矿表面的水分聚集形成水膜,水膜相互贯通形成水体,水液面沿着颗粒间孔隙向上迁移.

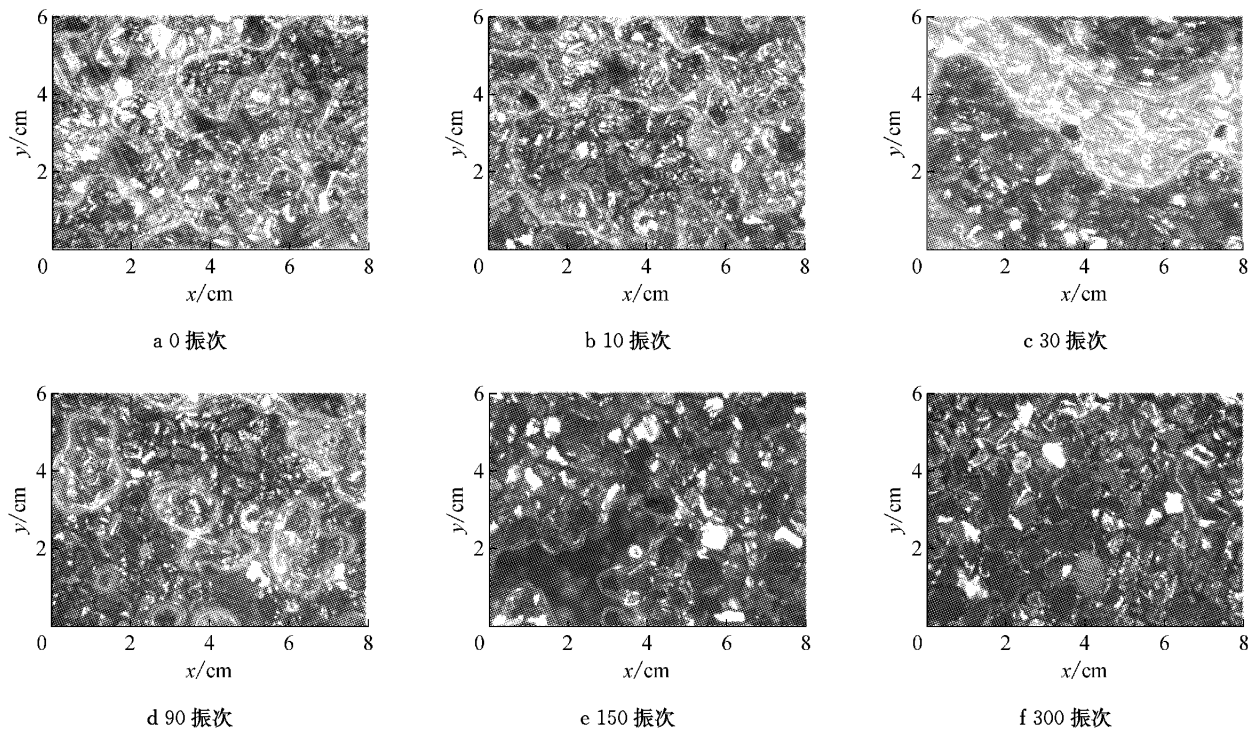


图 8 铁精矿流态化过程中水分的迁移规律(单位:cm)

Fig.8 Migration of moisture of iron ore concentrate fluidization process (unit: cm)

2.3.2 颗粒组构变化规律

为了在细观上方便研究颗粒的运动规律,将颗粒粒径大于 0.25 mm 的颗粒称为粗颗粒,粒径小于 0.25 mm 的颗粒称为细颗粒. 通过对细观图片的处理,可以得到试验前后铁精矿中粗细颗粒含量以及平面孔隙率的变化(表 4),对比三组试验前后细颗粒含量与平面孔隙率的变化可发现,试验前后细颗粒含量分别减少了 4%、5%、12%,平面孔隙率分别减少了 10%、12%、11%. 这说明在振动过程中,铁精矿颗粒骨架被压缩,孔隙体积减小;同时细颗粒通过粗颗粒间孔隙向下运动、填充下部孔隙,使得下部孔隙中水分被挤出;上部粗颗粒发生结构重组,孔隙变小,形成致密的粗颗粒骨架.

表 4 细颗粒含量和平面孔隙率变化

Tab.4 Change of fine particles content and planar void ratio

	10%, 0.3g		10%, 0.4g		10%, 0.5g	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
粗颗粒含量	0.19	0.33	0.21	0.38	0.21	0.44
细颗粒含量	0.36	0.32	0.34	0.29	0.34	0.22
平面孔隙率	0.45	0.35	0.45	0.33	0.45	0.34

上述对颗粒组构变化规律的分析,说明颗粒的运动规律主要表现为:细颗粒向下运动,填充下部孔隙,上部粗颗粒结构重组,形成致密的粗颗粒骨架,这一细观上的颗粒运动过程反应在宏观上就是滑动面从下往上迁移. 同时,结合第 2.2 节中位移分析可以看出,引起水分液面迁移的另一原因是细颗粒的

运动,表现为细颗粒向下运动,填充下部孔隙,孔隙中水分被挤出,引起水液面上升.

3 结论

本文利用室内振动台施加动力荷载,研究了铁精矿流态化过程中宏观现象、位移变化以及水分和颗粒的细观运动规律,结合宏观细观规律,揭示了铁精矿流态化的内在机理,主要有以下结论.

(1) 水液面上升是铁精矿发生流态化的主要原因. 水液面上升引起表层铁精矿强度降低,形成滑动面,导致铁精矿发生流态化.

(2) 引起水液面上升的主要原因是铁精矿的水分和细颗粒的迁移.

(3) 铁精矿流态化过程中的细观运动规律主要表现为:均布于颗粒表面的水膜聚集形成水体,沿着颗粒间孔隙向上流动;上部细颗粒向下迁移,填充下部粗颗粒孔隙,上部粗颗粒骨架结构重新排列.

参考文献:

- [1] Oger G, Doring M, Alessandrini B, *et al.* Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries [J]. *Journal of Computational Physics*. 2006, 213(2): 803.
- [2] 王洪亮, 董庆如. 船舶载运易流态化货物的风险和对策[J]. *中国海事*, 2011(4): 48.
WANG Hongliang, DONG Qingru. The risks of the ship carrying cargoes that may liquefy and countermeasures to be taken[J]. *China Maritime Safety*, 2011(4): 48.
- [3] IMSBC Code. International maritime solid bulk cargoes code [S]. London: International Maritime Organization, 2012.
- [4] 黄志. 船舶载运精矿粉的安全措施探讨[J]. *航海技术*, 2012(3): 24.
HUANG Zhi. Investigation the Security Measures of Shifting Mineral Ore[J]. *Marine Technology*, 2012(3): 24.
- [5] 孝建伟. 精矿粉安全装运研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
XIAO Jianwei. Study on safety loading and transportation of concentrate [D]. Dalian: Dalian University of Technology. 2011.
- [6] 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.
OU Yifang. Investigate the security technology of liquefied cargoes in shipping[J]. *World Shipping*, 2012, 35(2): 15.
- [7] Gallagher B, Stogsdill S, Stephenson R W. Influence of ore physical properties on the transportable moisture limit for barged materials [EB/OL]. (2005-12-25) <http://utc.mst.edu/research/r156.html>.
- [8] 王伟. 矿粉动力特性试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
WANG Wei. The dynamic characteristic of ore[D]. Shanghai: Tongji University. 2012.
- [9] 周健, 简琦薇, 张姣, 等. 循环荷载下铁精矿动力特性试验研究[J]. *岩土工程学报*. 2013(12): 2346.
ZHOU Jian, JIAN Qiwei, ZHANG Jiao, *et al.* Dynamic behaviors of iron ore concentrate under cyclic loading by hollow cylinder apparatus [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 2013(12): 2346.
- [10] 周健, 简琦薇, 吴晓红, 等. 散装铁精矿流态化特性的模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013(12): 2536.
ZHOU Jian, JIAN Qiwei, WU Xiaohong, *et al.* Model experimental study of fluidization of iron concentrate ore in bulk [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013(12): 2536.