

利用超重力分离铝熔体中的夹杂颗粒

宋高阳^{1,2)}, 宋波^{1)✉}, 杨玉厚¹⁾, 杨占兵¹⁾, 李龙飞¹⁾, 马良²⁾

1) 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083 2) 河北工程大学材料科学与工程学院, 邯郸 056038

✉ 通信作者, E-mail: songbo@metall.ustb.edu.cn

摘要 利用 Al-17% Si-4.5% Cu 熔体中密度较小的初生硅颗粒模拟金属熔体内部的夹杂物, 并采用超重力场分离熔体中的夹杂颗粒, 研究了不同重力系数条件下, 金属熔体中夹杂物的分离规律. 实验结果表明: 经过超重力处理后, 初生硅颗粒在试样上部区域发生明显的偏聚现象, 试样内部出现无初生硅颗粒区域, 且随着重力系数的增加, 无初生硅颗粒的区域面积逐渐增大, 说明重力系数越大, 硅颗粒在试样上部区域的聚集程度越好. 随着重力系数的增大, 试样的净化效率逐渐升高, 当重力系数(G)为 500 时, 试样的净化率达到了 84.98%. 利用 DPM 离散相模型对超重力场下熔体内部硅颗粒的具体受力情况进行分析, 并模拟研究铝熔体内部硅颗粒在不同重力场中的分离行为. 数值模拟结果证明了夹杂颗粒在沿着超重力方向上的运动行为近似符合 Stokes 运动定律. 这表明超重力场可以有效分离金属熔体中的夹杂物.

关键词 超重力; 铝熔体; 夹杂颗粒; 定向分离; 运动行为

分类号 TF19

Separation of inclusion particles from aluminum melt by super gravity

SONG Gao-yang^{1,2)}, SONG Bo^{1)✉}, YANG Yu-hou¹⁾, YANG Zhan-bing¹⁾, LI Long-fei¹⁾, MA Liang²⁾

1) State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) College of Materials Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

✉ Corresponding author, E-mail: songbo@metall.ustb.edu.cn

ABSTRACT The increasing demand for high-quality aluminum alloys in the automobile industry and other manufacturing fields has motivated manufacturers to produce cleaner aluminum alloys. However, conventional methods can barely meet the cleanliness requirements of many applications due to their low removal efficiencies. To develop an innovative and highly efficient method for separating inclusions from aluminum melt, this study investigated the separation behavior of silicon particles by super gravity under different gravity fields using the primary silicon particles of Al-17% Si-4.5% Cu melt to simulate the inclusions in molten metal. The experimental results show that primary silicon particles accumulate in the upper region of samples obtained by super gravity, while the area in which there are no primary particle appears in the sample. The accumulation effect of the silicon particles improves as the gravity coefficients increase. In addition, the purification efficiency of samples obtained by super gravity increases as the gravity coefficient increases. This paper found the purification efficiency of samples to reach 84.98% at a gravity coefficient of $G = 500$. Using the discrete phase model (DPM), the paper also analyzed the forces acting on the particles in the melt and simulated the separation behavior of silicon particles in the melt under various gravity fields. The simulation results indicate that the movement of silicon particles along the direction of super gravity approximately obeys Stokes' law. These results demonstrate that inclusion particles in aluminum melt can be separated effectively by super gravity.

KEY WORDS super gravity; aluminum melt; inclusion particles; directional separation; movement

随着铝合金在汽车制造业、航空航天、建筑行业以及电子元件等领域的广泛应用,对于铝合金性能的要求日益提高.然而铝合金中夹杂物的存在不仅增加了铝熔体黏度,降低铝合金的铸造性能^[1],而且在金属变形过程中,夹杂物周围将产生应力集中,导致疲劳裂纹,严重影响了铝合金的加工性能^[2]以及机械性能^[3],因此,最大限度降低金属内部夹杂物的含量水平显得尤为重要.传统的金属熔体净化方法包括普通重力沉降、过滤^[4]、气泡上浮^[5]等,这些传统净化方法能够有效去除大尺寸的夹杂颗粒,但是对于微小尺寸的夹杂颗粒去除效果不佳^[6],很难满足高质量合金对于洁净度的要求,因此有必要探索一种更为高效的夹杂物分离新技术.

超重力作为一种过程强化的新技术正日益受到各个领域研究者的重视,目前国内外对超重力技术的应用研究主要集中在蒸馏、精馏、环保除尘以及生物氧化反应过程的强化等方面^[7-8].近年来,超重力技术开始被应用在冶金领域,主要包括金属内杂质元素去除、冶金等级硅提纯、冶金渣中有价元素的富集提取以及金属熔体中非金属夹杂物的分离等方面. Yang 等^[9]利用超重力分离与超重力过滤的方法去除粗铅合金中杂质元素 Cu,经过超重力分离后杂质元素 Cu 的质量分数由初始的 3% 降低至 0.113%,铝合金的净化率达到了 94.27%,而经过超重力过滤后杂质元素 Cu 的去除率达到了 96.18%. Li 等^[10]将超重力场和酸浸出的方法应用于 Al-Si 合金凝固提纯工艺,超重力得到的提纯硅纯度由冶金等级硅的 99.59% 增加到 99.92%,金属杂质元素的去除分数达到 90% 以上. Li 等^[11-14]将超重力技术应用到实际冶金渣中有价元素的富集提取,实验结果证明有价元素的回收率显著,其中含钛高炉渣中钛的回收率可达 81.28%. 随后超重力场被引入到铝熔体中非金属夹杂物的分离去除上,实验结果表明超重力可以有效强化夹杂颗粒的定向分离过程^[15].然而关于超重力对于金属熔体中密度较小的夹杂颗粒分离效果的研究鲜有报道,而且相关的理论研究还比较匮乏.本文利用铝合金熔体中的初生硅颗粒来模拟熔体内密度较小的夹杂物颗粒^[2,16],研究了不同重力场条件下夹杂颗粒在熔体内部的分布规律,并分析了超重力场下夹杂颗粒的运动行为,进而为超重力应用到钢液中非金属夹杂物的分离去除提供科学依据.

1 实验设备及方法

1.1 实验设备

实验所用设备为自行设计改装的超重力冶金装

置,其由离心旋转系统和加热系统两部分组成,图 1 为超重力装置示意图.超重力场可以由离心旋转的方式实现,利用重力系数来表征重力场的大小,重力系数 G 为离心旋转状态下的加速度与常重力加速度之比,其公式如下:

$$G = \frac{\sqrt{g^2 + (r\omega^2)^2}}{g} = \sqrt{g^2 + \left(\frac{N^2\pi^2 r}{900}\right)^2} \quad (1)$$

式中: ω 为离心机旋转角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; N 为离心机转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; r 为旋转轴与试样中心的距离, 0.25 m; g 为常重力加速度, $9.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. 当在普通重力场条件下,即 $N=0, G=1$.

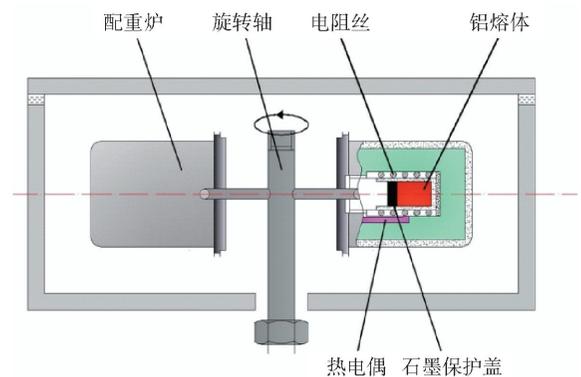


图 1 超重力实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of super-gravity apparatus

1.2 实验方法

本实验利用 Al-17% Si-4.5% Cu 熔体中的初生硅颗粒模拟金属熔体中的非金属夹杂物,这种方法的优点在于每次实验时析出的初生硅颗粒弥散分布,不会因为夹杂物自身分布不均对除杂效果造成影响.而且由于合金熔体中有一定含量的重金属 Cu 存在,初生硅颗粒的密度低于周围熔体的密度^[2],可以反映出一般较熔体轻的非金属夹杂物颗粒在超重力场中的运动行为和迁移规律.

取 35 g 铝合金 (Al-17% Si-4.5% Cu) 放入内径 19 mm 的高纯石墨坩锅中,将坩锅放入超重力设备炉膛内进行加热并升温至 700 °C,保温 10 min,使合金完全熔化.然后将离心机调至所需的转速,开启离心机进行超重力处理,同时关闭加热电源使合金试样随炉冷却,待炉温降至 550 °C 时试样完全凝固,此时停止超重力处理并取出试样进行喷水快速冷却.将获得的试样沿超重力方向切成两个半圆,试样进行粗磨,抛光,利用数码相机 (Canon EOS 1300D) 和金相显微镜 (Leica DM4M) 分别从宏观和微观两个角度对初生硅颗粒的分布规律进行表征.

2 实验结果与讨论

2.1 不同重力场下试样的宏观观察以及试样的净化率

图2为不同重力场下获得试样的纵剖面图,试样内部出现的孔洞缺陷可能是试样在快速冷却凝固过程中形成的^[2]. 在普通重力场条件下,初生硅颗粒在整个试样截面上弥散分布并未发生明显的偏聚现象,如图2(a)所示. 然而在超重力场中,超重力可以降低硅颗粒的临界形核功,促进初生硅颗粒的形核与析出^[17-19],析出的初生硅颗粒在超重力的作用下向试样的上部区域进行快速迁移并聚集,由图

2(b)~2(e)可以看出,在超重力场下,初生硅颗粒在试样的上部区域出现了明显的偏聚现象,而且随着重力系数的增加,硅颗粒在试样上部的偏聚富集程度变大. 经过超重力场处理后,试样中下部区域出现了无初生硅颗粒的区域,而且重力系数越大,无初生硅颗粒的区域面积越大. 然而经过超重力处理后的试样边部依然存在着定量的初生硅颗粒,这可能是因为试样边部紧挨着坩埚壁面,初生硅颗粒易于依附坩埚壁面形核长大,而且熔体中的硅颗粒被壁面捕获后由于受到较大的黏滞阻力而留在试样的边部区域^[2],但是随着超重力的增大,试样边部硅颗粒的数量有明显的减少趋势,如图2(b)~2(e).

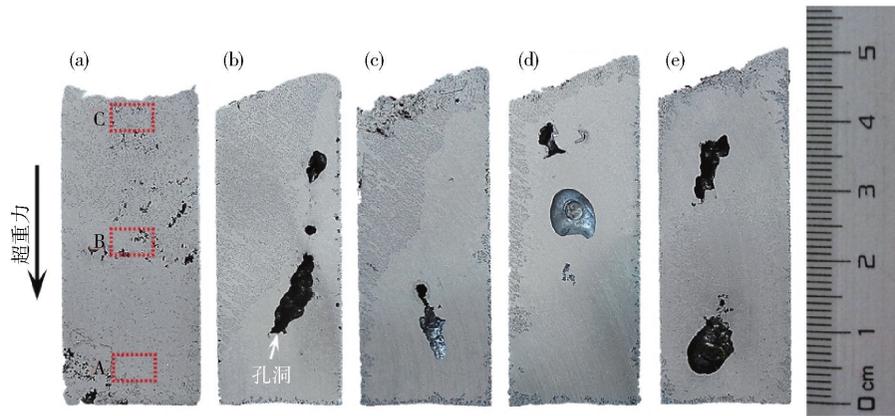


图2 不同重力场条件下获得的试样宏观纵剖面图. (a) $G=1$; (b) $G=20$; (c) $G=50$; (d) $G=100$; (e) $G=500$

Fig.2 Cross section of samples obtained with different gravity coefficients: (a) $G=1$; (b) $G=20$; (c) $G=50$; (d) $G=100$; (e) $G=500$

为具体表征不同重力场下试样内部初生硅颗粒的分离效果,将试样内部无初生硅颗粒的区域占整个试样截面的面积百分数定义为试样的净化率(η). 由图3可以看出,随着重力系数的增加,试样的净化率显著增大,当 $G \geq 100$ 时,试样的净化率增加缓慢,当 $G=500$ 时,试样的净化率达到了84.98%.

2.2 不同重力场下试样内部不同位置的硅颗粒分布

图4为不同重力场下试样内部不同位置的显微组织,在普通重力场条件下,整个试样内部的初生硅颗粒出现了一定程度的偏聚现象,试样下部区域只存在定量的小尺寸硅颗粒,而试样上部区域的硅颗粒的尺寸较大且数量明显增多,如图4(a)~4(c)所示,这是由于密度较小的硅颗粒在常重力的作用下从试样底部向上部进行缓慢迁移. 而在超重力场条件下,熔体内部的硅颗粒将沿着超重力的反方向进行快速迁移,经过超重力处理后,初生硅颗粒从试样底部到试样上部的方向上出现了更为明显的偏聚现象,说明施加的超重力强化了初生硅颗粒向试样上部区域上浮的过程. 而且随着重力系数的增加,初

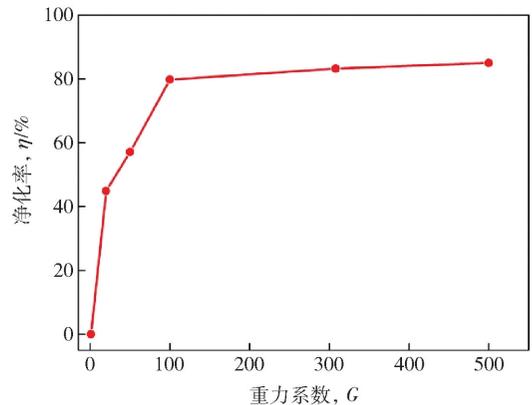


图3 不同重力系数条件下试样的净化效率

Fig.3 Purification efficiencies of samples obtained under different gravity fields

生硅颗粒在试样上部的富集程度越来越显著,当重力系数 $G=500$ 时,试样的下部、中部区域已经非常干净,几乎找不到大尺寸的初生硅颗粒,大量的硅颗粒被富集在试样的上部区域,如图4(j)~4(l)所示. 图5为超重力场下熔体内部硅颗粒的分离示意图,进一步阐明了超重力有效分离金属熔体中夹杂颗粒的过程.

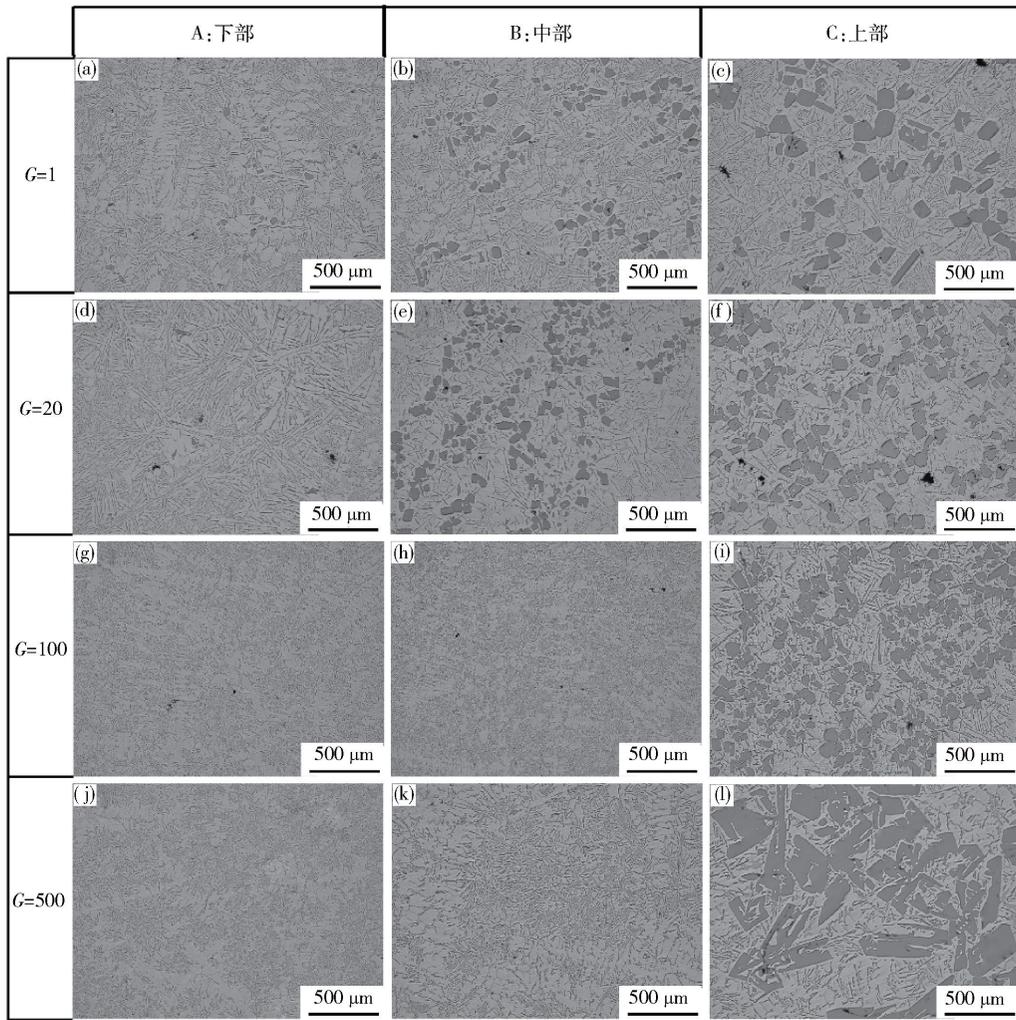


图 4 不同重力场下硅颗粒在试样不同位置的分布情况 (图中 A、B、C 分别对应图 2 中的 A、B、C 区域)

Fig. 4 Distributions of primary silicon particles in different sample areas obtained with different gravity coefficients (A, B, C in Figure 4 correspond to the areas marked in Figure 2, respectively)

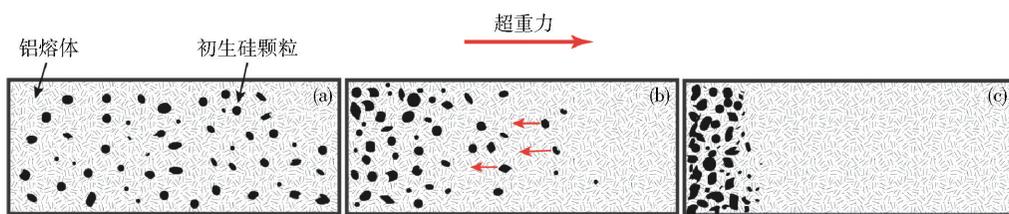


图 5 超重力场中铝熔体内部硅颗粒的分离过程示意图。(a) 初生硅颗粒析出; (b) 施加超重力; (c) 分离完成

Fig. 5 Schematic diagram of inclusion separation process under super-gravity field: (a) primary silicon precipitation; (b) imposition of super gravity; (c) separation completion

2.3 不同重力场中硅颗粒的运动行为理论分析

2.3.1 不同重力场中硅颗粒的运动速度

在离心力场中,黏性熔体内部的单个固相颗粒的运动行为被认为符合 Stokes 定律^[20],即固相颗粒在受到离心力、普通重力、浮力以及黏滞阻力时可在瞬间达到平衡沉降速度,颗粒的平衡速度公式如下:

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_L) d^2 Gg}{18\zeta} \quad (2)$$

式中: v 为粒子的平衡速度, $m \cdot s^{-1}$, 也称之为 Stokes

运动速度; ρ_p 与 ρ_L 分别为夹杂物与金属熔体的密度, $kg \cdot m^{-3}$; d 为夹杂物的直径, m ; G 为重力系数; g 为普通重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; ζ 为金属熔体的黏度, $Pa \cdot s$. 由 Stokes 公式可以看出,颗粒的运动速度分别与密度差、粒子尺寸以及重力系数成正比,与熔体的黏度成反比.

然而在某些具体体系条件下,一些不常见或不易求解的力比如布朗力、压力梯度力、萨夫曼升力等可能对夹杂物的运动造成较大的影响,比如高温条

件下尺寸微小的夹杂物由于剧烈的布朗运动会对夹杂物的运动行为造成较大影响,因此其所受到的布朗力不能忽略^[21,22]. 因此有必要利用 FLUENT 软件中的 DPM 离散相模型对超重力场中夹杂颗粒的运动行为进行计算,当颗粒在额外受到布朗力、压力梯度力等时,分析其运动速度与理论 Stokes 平衡速度的关系. 为便于模拟研究,这里进行假设:(1) 不考虑熔体内部固相颗粒之间的相互作用,比如碰撞、聚合等现象;(2) 熔体内部的固相颗粒浓度较低且尺寸微小,不考虑夹杂物运动对熔体流场的影响;(3) 金属熔体为黏性不可压缩 Newton 流体,且由于模拟的时间很短,忽略温度变化对熔体黏度的影响,即熔体黏度不变. 表 1 为模拟所用到的铝熔体以及硅颗粒的物性参数,文中所建立的模型中 X 方向为超重力方向,Y 方向为普通重力方向.

表 1 铝熔体与夹杂颗粒的物性参数

Table 1 Physical properties of aluminum melt and inclusion particles in simulation

温度/°C	铝熔体		初生硅颗粒	
	黏度/(Pa·s)	密度/(g·cm ⁻³)	密度/(g·cm ⁻³)	直径/μm
600	1.860 × 10 ⁻³	2.546	2.315	30

图 6 为不同重力场条件下熔体内部硅颗粒在不同时刻速度分布的模拟结果,图中的虚线代表相应的 Stokes 平衡速度. 图中硅颗粒在 X 方向上的运动

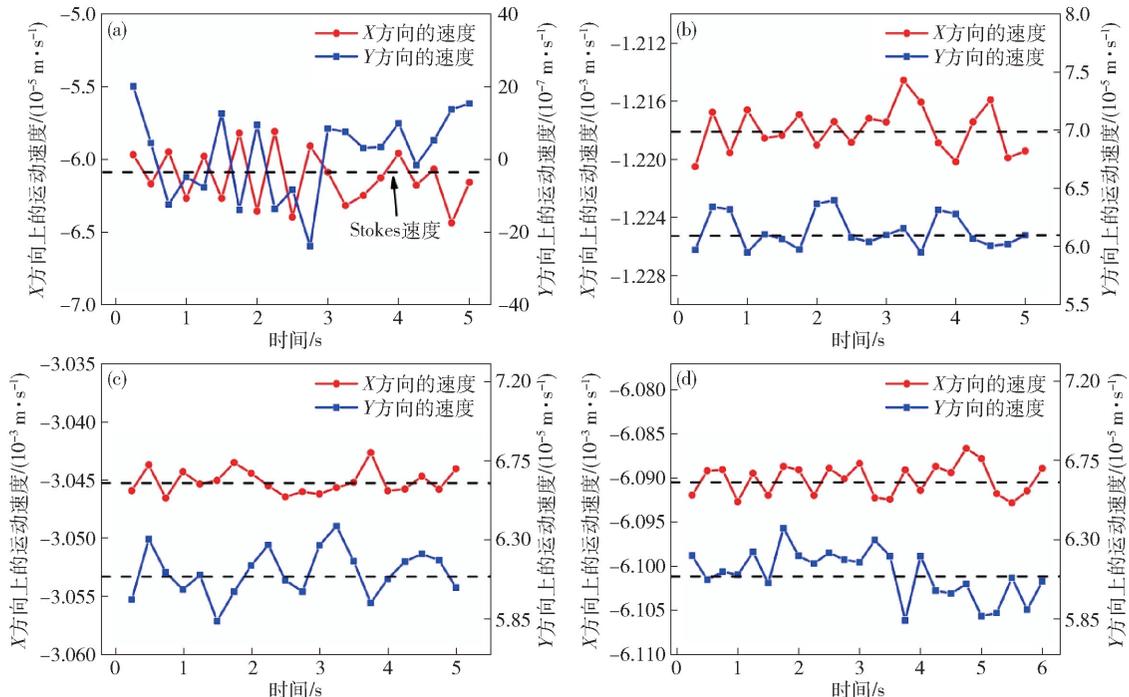


图 6 不同重力场条件下硅颗粒在不同时刻的速度分布情况. (a) G=1; (b) G=20; (c) G=50; (d) G=100

Fig. 6 Velocity distributions of silicon particles at different times with different gravity coefficients: (a) G=1; (b) G=20; (c) G=50; (d) G=100

速度为负值,说明硅颗粒的运动方向与超重力方向相反. 由图 6 可以看出,在考虑布朗力、压力梯度力等对硅颗粒运动速度的影响时,硅颗粒无论沿 X 方向还是 Y 方向的运动速度都不再平衡,而是均绕着相应的理论 Stokes 平衡速度上下波动. 表 2 为不同重力场条件下硅颗粒沿 X 方向上的平均运动速度与相应的 Stokes 平衡速度,由表 2 可以看出,硅颗粒的平均运动速度非常接近相应的 Stokes 平衡速度,说明布朗力、压力梯度力等对硅颗粒运动速度的影响可忽略,此时可以认为硅颗粒在超重力场中的运动行为近似符合 Stokes 运动定律. 而且由图 6 与表 2 还可以看出,随着重力系数的增加,硅颗粒在超重力方向上的运动速度显著增大.

表 2 不同重力场下硅颗粒沿 X 方向上的平均速度与相应的理论 Stokes 平衡速度

Table 2 Average velocities of silicon particles and the corresponding Stokes velocities along the direction of super gravity with different gravity coefficients

重力系数, G	Stokes 平衡速度/(m·s ⁻¹)	X 方向上的速度/(m·s ⁻¹)
1	6.09051 × 10 ⁻⁵	6.12927 × 10 ⁻⁵
20	1.21810 × 10 ⁻³	1.21798 × 10 ⁻³
50	3.04526 × 10 ⁻³	3.04369 × 10 ⁻³
100	6.09051 × 10 ⁻³	6.08996 × 10 ⁻³

2.3.2 不同重力场中硅颗粒的理论分布

图 7 为利用 DPM 离散相模型得到的不同重力

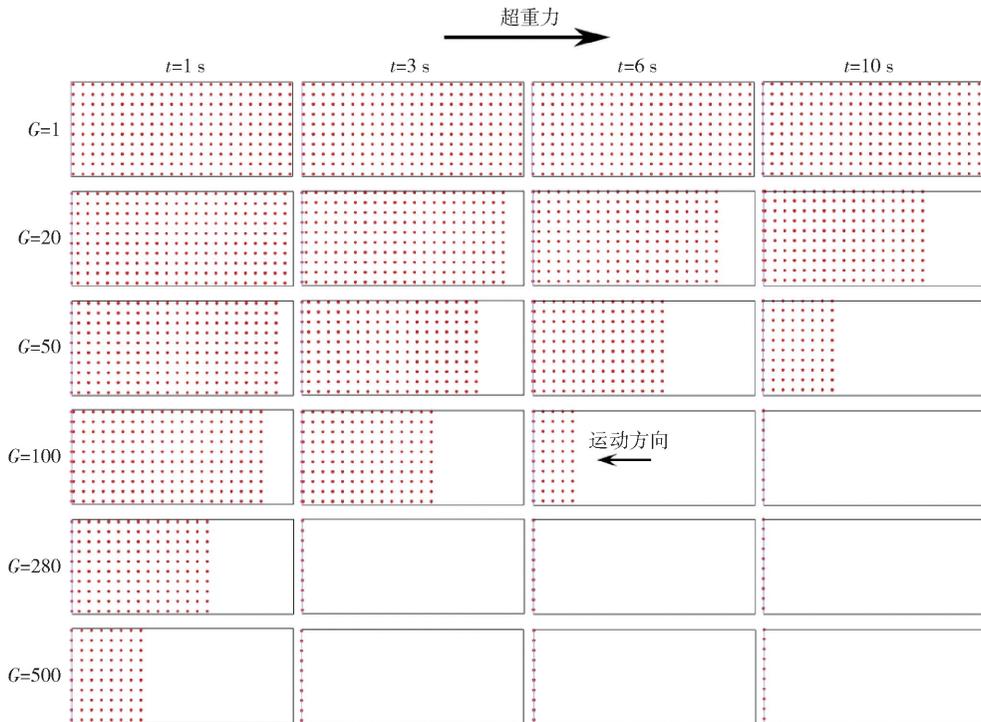


图 7 不同重力场条件下硅颗粒在不同时刻的分布

Fig. 7 Distributions of silicon particles at different times under different gravity fields

场条件下硅颗粒在不同时刻分布的模拟结果,图中 t 为分离时间. 由图可以看出,普通重力条件下,硅颗粒在试样内部依然弥散分布,并未发生明显的偏聚现象;当重力系数 G 为 20 时,试样内部硅颗粒出现了明显的定向迁移现象,试样右部区域出现了无硅颗粒区域,这是由于熔体内部密度较小的硅颗粒在超重力场中沿着超重力的反方向进行迁移富集. 而且随着重力系数的增加,在相同时间内,试样内部无硅颗粒区域面积逐渐增大,说明熔体内部硅颗粒的定向富集现象越显著. 图 7 中的模拟结果与图 4 中的实验结果相吻合,进一步表明了超重力可以强化金属熔体内部固相颗粒的定向分离与富集,这也为将超重力引入到高温钢液中非金属夹杂物的分离去除上提供了一定的实验参考与科学依据.

3 结论

(1) 超重力场能够有效分离金属熔体中密度较小的夹杂颗粒,初生硅颗粒在超重力作用下沿着超重力的反方向做定向迁移并富集在试样的上部区域. 超重力对铝熔体中初生硅颗粒显著的分离效果为超重力应用到高温钢液中非金属夹杂物的去除上提供了科学依据.

(2) 随着重力系数的增加,熔体中夹杂物在试样上部区域的富集程度更显著,熔体净化效果更好,当 $G=500$ 时,试样的净化率达到了 84.98%,表

明了超重力场可以强化夹杂颗粒在熔体中的上浮过程.

(3) 当额外考虑布朗力、压力梯度力等对硅颗粒运动速度的影响时,硅颗粒无论沿超重力方向还是普通重力方向的运动速度不再平衡,而是均绕着相应的 Stokes 平衡速度上下波动. 然而硅颗粒的平均运动速度非常接近相应的 Stokes 平衡速度,可以认为硅颗粒在超重力场中的运动行为近似符合 Stokes 运动定律.

参 考 文 献

- [1] Shu D, Li T X, Sun B D, et al. Numerical calculation of the electromagnetic expulsive force upon nonmetallic inclusions in an aluminum melt; Part I. Spherical particles. *Metall Mater Trans B*, 2000, 31(6): 1527
- [2] He Y J, Li Q L, Liu W. Separating effect of a novel combined magnetic field on inclusions in molten aluminum alloy. *Metall Mater Trans B*, 2012, 43(5): 1149
- [3] Zhou C, Cui J Z. Influence of inclusions on mechanical properties of 6063 Al alloy. *J Mater Metall*, 2013, 12(1): 72
(周策, 崔建忠. 夹杂物对 6063 铝合金力学性能的影响. 材料与冶金学报, 2013, 12(1): 72)
- [4] Song G Y, Song B, Yang Z B, et al. Removal of inclusions from molten aluminum by supergravity filtration. *Metall Mater Trans B*, 2016, 47(6): 3435
- [5] Gaustad G, Olivetti E, Kirchain R. Improving aluminum recy-

- cling: a survey of sorting and impurity removal technologies. *Resource Conservation Recycl*, 2012, 58: 79
- [6] Takahashi K, Taniguchi S. Electromagnetic separation of non-metallic inclusion from liquid metal by imposition of high frequency magnetic field. *ISIJ Int*, 2003, 43(6): 820
- [7] Zou H K, Shao L, Chen J F. Progress of higee technology—from laboratory to commercialization. *J Chem Ind Eng*, 2006, 57(8): 1810
(邹海魁, 邵磊, 陈建峰. 超重力技术进展——从实验室到工业化. *化工学报*, 2006, 57(8): 1810)
- [8] Zhao H, Shao L, Chen J F. High-gravity process intensification technology and application. *Chem Eng J*, 2010, 156(3): 588
- [9] Yang Y H, Song B, Song G Y, et al. Enriching and separating primary copper impurity from Pb-3 mass pct Cu melt by super-gravity technology. *Metall Mater Trans B*, 2016, 47(5): 2714
- [10] Li J W, Guo Z C, Tang H Q, et al. Si purification by solidification of Al-Si melt with super gravity. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2012, 22(4): 958
- [11] Li J C, Guo Z C. Innovative methodology to enrich britholite ($\text{Ca}_3\text{Ce}_2[(\text{Si},\text{P})\text{O}_4]_3\text{F}$) phase from rare-earth-rich slag by super gravity. *Metall Mater Trans B*, 2014, 45(4): 1272
- [12] Li J C, Guo Z C, Gao J T. Laboratory assessment of isothermal separation of V containing spinel phase from vanadium slag by centrifugal casting. *Ironmaking Steelmaking*, 2014, 41(9): 710
- [13] Li J C, Guo Z C, Gao J T. Isothermal enriching perovskite phase from $\text{CaO-TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ melt by super gravity. *ISIJ Int*, 2014, 54(4): 743
- [14] Li J C, Guo Z C, Gao J T. Enriching perovskite phase from $\text{CaO-TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ melt by super gravity during cooling process. *Chin J Rare Met*, 2014, 38(1): 93
(李军成, 郭占成, 高金涛. $\text{CaO-TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 熔体冷却过程中钙钛矿相超重力富集. *稀有金属*, 2014, 38(1): 93)
- [15] Song G Y, Song B, Yang Y H, et al. Separating behavior of nonmetallic inclusions in molten aluminum under super-gravity field. *Metall Mater Trans B*, 2015, 46(5): 2190
- [16] Han Y C, Li Q L, Liu W, et al. Effect of electromagnetic vibration on the agglomeration behavior of primary silicon in hypereutectic Al-Si alloy. *Metall Mater Trans A*, 2012, 43(5): 1400
- [17] Chen K, Hu Z Q, Ding B. Nucleation in metallic melt on the ground and under elevated gravity. *J Mater Sci Technol*, 1994, 10(4): 307
- [18] Zhao L X, Guo Z C, Wang Z, et al. Influences of super-gravity field on aluminum grain refining. *Metall Mater Trans A*, 2010, 41(3): 670
- [19] Jia S J, Song B, Song G Y, et al. Effect of super-gravity field on solidification structure of Al-6% Cu alloy. *Chin J Process Eng*, 2014, 14(5): 880
(贾树建, 宋波, 宋高阳, 等. 超重力对 Al-6% Cu 合金凝固组织的影响. *过程工程学报*, 2014, 14(5): 880)
- [20] Ogawa T, Watanabe Y, Sato H, et al. Theoretical study on fabrication of functionally graded material with density gradient by a centrifugal solid-particle method. *Compos Part A: Appl Sci Manuf*, 2006, 37(12): 2194
- [21] Wang Y, Li H, Guo L F. Numerical simulation of the force condition of spherical inclusion particles in liquid steel. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2013, 35(11): 1437
(王耀, 李宏, 郭洛方. 钢液中球状夹杂物颗粒受力情况的数值模拟. *北京科技大学学报*, 2013, 35(11): 1437)
- [22] Li A, Ahmadi G. Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow. *Aerosol Sci Technol*, 1992, 16(4): 209