

# 夹杂物在渣层运动上浮的水模型研究

周 丰<sup>1</sup>, 曹建其<sup>2</sup>, 尹力赋<sup>2</sup>, 齐红宇<sup>2</sup>, 郝 杰<sup>2</sup>, 陈 超<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>山西太钢不锈钢股份有限公司炼钢二厂, 山西 太原

<sup>2</sup>太原理工大学材料科学与工程学院, 山西 太原

收稿日期: 2022年7月8日; 录用日期: 2022年8月4日; 发布日期: 2022年8月12日

## 摘 要

为研究夹杂物在去除过程中, 在钢-渣界面的运动, 基于相似原理, 用 $Al_2O_3$ 和聚丙烯PP (polypropylene) 粒子模拟夹杂物, 水模拟钢液, 硅油模拟钢渣, 建立了一个水模型。通过改变粒子尺寸、种类, 以及油层黏度等因素, 观察粒子在不同条件下在水-油界面上浮的运动过程, 从而分析实际炼钢生产过程中各种因素对夹杂物去除的影响。实验结果表明, 粒子在水中只需不到1 s的时间, 即可加速至终端速度, 其到达水-油界面时的速度主要与粒子密度及尺寸有关。当粒子到达水-油界面时, 会与界面发生能量交换。只有当粒子的动能超过了界面变形所需能量, 粒子才可以顺利穿过界面。否则, 粒子只能滞留在水-油界面。当油层一定时, PP粒子的无量纲位移大于密度更小的 $Al_2O_3$ 粒子的无量纲位移, 说明密度大的更容易穿过界面。而油层黏度也对粒子运动有一定影响, 油层黏度越大, 对粒子穿越过程的阻碍也越大, 越不利于粒子穿过界面。主要影响因素是粒子与界面间的相互作用关系, 即总润湿性。

## 关键词

非金属夹杂物, 钢-渣界面, 水模型, 夹杂物去除

# Study on Water Model of Inclusions Floating up in Slag Layer

Feng Zhou<sup>1</sup>, Jianqi Cao<sup>2</sup>, Lifu Yin<sup>2</sup>, Hongyu Qi<sup>2</sup>, Jie Hao<sup>2</sup>, Chao Chen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>No.2 Steelmaking Plant, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd., Taiyuan Shanxi

<sup>2</sup>College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Jul. 8<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 4<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 12<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In order to study the movement of inclusions at the steel-slag interface during the removal process,

\*通讯作者。

文章引用: 周丰, 曹建其, 尹力赋, 齐红宇, 郝杰, 陈超. 夹杂物在渣层运动上浮的水模型研究[J]. 冶金工程, 2022, 9(3): 181-192. DOI: 10.12677/meng.2022.93023

based on the similarity principle, a water model was established. In the model,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and PP particles were used to simulate inclusions, water was used to simulate molten steel, and silicone oil was used to simulate steel slag. By changing the size and type of the particles, and the viscosity of the oil layer, the movement process of the particles floating up through the water-oil interface under different conditions was observed, so as to analyze the influence of the above-mentioned factors on the removal of inclusions in the actual steelmaking production process. The experimental results show that the particles can be accelerated to the terminal velocity in less than 1s in water. Therefore, the velocities when they reach the water-oil interface are mainly related to the particles' density and size. When the particles reach the water-oil interface, they exchange energy with the interface. Only when the kinetic energy of the particle exceeds the energy required to deform the interface, the particles can pass through the interface. Otherwise, the particles can only stay at the water-oil interface. When the oil layer is fixed, the dimensionless displacement of the PP particles is greater than that of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles whose density is much smaller, indicating that the denser ones are easier to pass through the interface. The viscosity of the oil layer also has a certain influence on the movement of the particles. The greater the viscosity of the oil layer, the greater the obstacle for the particle to pass, and the less favorable for the particles to pass through the interface. The main influencing factor is the interaction between the particles and the interface, that is, the total wet ability.

## Keywords

Non-Metallic Inclusions, Steel-Slag Interface, Water Model, The Removal of Inclusions

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钢中的非金属夹杂物对钢的性能有很大的影响,会使钢的塑性、韧性和强度等性能降低,甚至使材料出现空隙或形成裂纹[1]。只有在极少数情况下,夹杂物可以起到改善钢铁性能的作用。由此可见,为了避免非金属夹杂物对钢的组织 and 性能等方面产生严重的影响,在炼钢、精炼和连铸等过程中,需要对非金属夹杂物进行有效地去除。

夹杂物的去除主要有气体搅拌、顶渣吸附、电磁净化、渣洗等方法,最常见的是在精炼过程中吹氩促进夹杂物上浮至顶渣被吸附。这个过程主要包括四个步骤[2]: 1) 夹杂物在钢液中上浮; 2) 夹杂物穿越钢-渣界面的速度边界层(适用于小颗粒夹杂物); 3) 夹杂物在钢-渣界面的运动; 4) 夹杂物溶解在渣中。Chen 等[3]对夹杂物在中间包钢-渣界面速度边界层沉积现象展开研究,表明界面滑移速度对小尺寸夹杂物影响较大,大颗粒夹杂物受边界层影响较小,可以忽略边界层的影响,仅考虑步骤(3)和(4)。由于步骤(3)是三相间的相互作用,情况比较复杂,研究难度较大。但这个过程是夹杂物上浮并进入渣层的关键过程,直接决定了夹杂物能否顺利被顶渣吸收,对夹杂物的去除过程有非常重要的意义,近年来这一过程也得到了越来越多的学者的关注[4]。

周业连[5] [6] [7]等人对固态和液态夹杂物在渣钢界面的分离过程进行了物理模拟实验和理论计算,用水模拟钢液;分别用煤油、豆油和泵油模拟不同的精炼渣;用石蜡制成不同形状的颗粒模拟夹杂物,并用相机记录了石蜡上浮的运动过程以及在水油界面的运动行为和特点,研究了钢包内固态夹杂物渣钢界面的运动去除过程,物理模拟实验结果与计算结果吻合较好。孙丽媛[8]、刘超[9] [10] [11]、Yang [12]等人对夹杂物在渣钢界面的分离过程进行了系统的研究,通过水模型实验直观地观察到夹杂物靠近渣钢

界面、穿过界面、最终完全进入渣层的整个过程，同时研究了上浮速度等因素对夹杂物上浮的影响。

本研究基于相似理论建立水模型，模拟钢-渣界面非金属夹杂物的分离过程，从而研究夹杂物上浮速度和尺寸以及渣的性质等因素对分离过程的影响。

## 2. 实验内容

### 2.1. 实验原理

#### 1) 静态相似

夹杂物在钢渣界面的运动过程，是一个三相间相互作用，相互润湿的体系，对该体系的建立，需要保证三者间基础的静态相似。

本实验中，为保证模拟系统出现明显的液液界面，实验中选择了与水的黏附功较小的非极性有机物——液态硅油。由于水油之间不互溶，且油层密度比水密度小，可以明显观测到类似钢渣界面的水油界面。同时，油层与非油性物质均具有较低的界面张力，尤其对于高分子聚合物，因此油层很容易润湿该类的粒子，这与实际冶金过程中渣相易于润湿并吸收钢中氧化物夹杂的过程是类似的。因此，本实验采用  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和聚丙烯 PP (polypropylene) 粒子模拟钢中夹杂物，其与油层接触、上浮及浸入的过程可用于模拟钢中非金属夹杂物上浮到顶渣直至被吸收去除的过程。

#### 2) 动力黏度相似

为保证油层具有适合的界面性质，保证与实际钢渣的动力黏度相似：

$$\frac{\mu_w}{\mu_{st}} = \frac{\mu_o}{\mu_{sl}} \quad (1)$$

式中： $\mu_w$ ——水的动力黏度； $\mu_o$ ——硅油的动力黏度； $\mu_{st}$ ——钢液的动力黏度； $\mu_{sl}$ ——钢渣的动力黏度。

通过查阅资料可知[13] [14] [15] [16] [17]，液态钢渣的动力黏度约为 0.02~0.3 Pa·s，钢液的黏度值约为  $2\sim 6.5 \times 10^{-3}$  Pa·s。在温度为 20℃ 时，水的动力黏度约为  $1 \times 10^{-3}$  Pa·s，则由式(1)计算得到模拟所用硅油的动力黏度  $\mu_o$  范围为 0.0031~0.15 Pa·s。

### 2.2. 实验方案

实验所用的设备主要有容器、富煌君达千眼狼 5KF20S 高速摄像机(相机自带运动分析软件)。实验容器为由亚克力制成的  $\Phi 445 \times 600$  mm 的圆柱形容器，底部圆心处开一个  $\Phi 10$  mm 的口，为消除折射，圆柱外围围上棱长 600 mm 的正方体容器，如图 1 所示。实验装置实物图如图 2 所示。

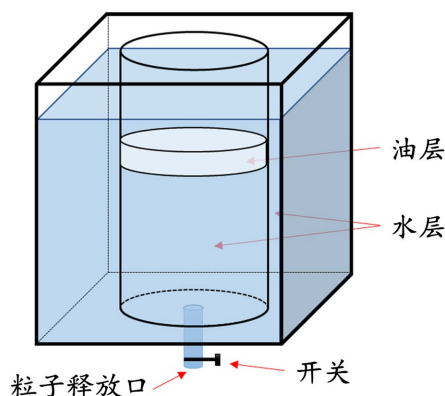


Figure 1. Schematic diagram of experimental equipment

图 1. 实验设备示意图



**Figure 2.** Experimental equipment  
**图 2.** 实验设备

本次实验中，所用硅油和水与实验容器壁的接触角不同，因此，水-油界面在容器壁处会形成弯月面。两种液体折射率不同，如果使用的粒子尺寸过小，将影响对小球运动过程的观察及分析，因此本次实验所选粒子尺寸较大。本次实验中所采用的粒子及两种硅油数据如表 1、表 2 所示。

**Table 1.** Experimental particles data  
**表 1.** 实验粒子数据

种类	直径/mm	平均密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
PP	2.36、3.16、3.98	0.91
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2~4 不等	0.71

**Table 2.** Experimental silicon oil data  
**表 2.** 实验硅油数据

种类	运动黏度/cst	比重	动力黏度/ $\text{Pa}\cdot\text{s}$
Silicon oilAK50	50	0.960	0.048
Silicon oilAK100	100	0.964	0.096

实验具体步骤如下：

- 1) 向圆柱形容器中加水，使液面高度达到 30 或 50 cm，再加入厚度  $> 5 \text{ mm}$  的硅油，并向圆柱形容器外侧加水，使其液面高度大于内侧，静置至水油界面无小气泡；
- 2) 打开补光光源，调整摄像机高度，使其与水油界面平齐，并设置摄像机帧数 100，拍摄时长 6 s；
- 3) 从底部释放粒子，并使摄像机录制其在界面附近的运动过程，随后将拍摄的视频导出；
- 4) 将拍摄的视频导入运动分析软件中，分析粒子位置随时间的变化关系；
- 5) 将运动分析软件得到的粒子位移数据进行处理，然后导入 origin 中，绘制图像，并对位移求得速度随时间变化关系。

### 3. 结果分析

#### 3.1. 粒子在水中终端速度

根据杨宏博等[18]的研究，夹杂物的运动根据雷诺数的不同可以分为三种情况： $\text{Re} < 1$  为低雷诺数运

动,  $Re > 500$  为高雷诺数运动,  $1 < Re < 500$  为中雷诺数运动。根据本次实验的实验条件可以得出本次实验中粒子在水中主要为中雷诺数运动。

夹杂物在钢液中的上浮过程主要受到浮力  $F_b$ 、重力  $F_g$ 、黏性阻力  $F_d$  和附加质量力  $F_m$ 。根据牛顿第二定律, 夹杂物的运动满足式(2):

$$F_f - F_g - F_d - F_m = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_l \alpha \quad (2)$$

式中:  $\rho_l$ ——夹杂物密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$R$ ——夹杂物半径,  $\text{m}$ ;

$\alpha$ ——夹杂物加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

当夹杂物达到终端速度时, 其加速度为零, 则所受到的附加质量力也为零, 可以得到夹杂物的终端速度  $v_m$  如式(3)所示:

$$v_m = \frac{2(\rho_f - \rho_l)gR^2}{9\mu(1 + 0.15Re^{0.687})} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho_f v d}{\mu} \quad (4)$$

式中:  $\rho_f$ ——流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$v$ ——粒子运动速度,  $\text{m/s}$ ;

$d$ ——粒子直径,  $\text{m}$ ;

$\mu$ ——流体黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

代入数据可以得到, 本次实验中, 所使用的直径在 2~4 mm 之间的 PP 粒子终端速度范围为 0.0452~0.0848 m/s,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子终端速度范围为 0.0960~0.1741 m/s。利用 Matlab 对式(3)进行积分可以得到粒子的位移曲线, 直径 4 mm 的 PP 粒子在水中运动过程如图 3 所示。

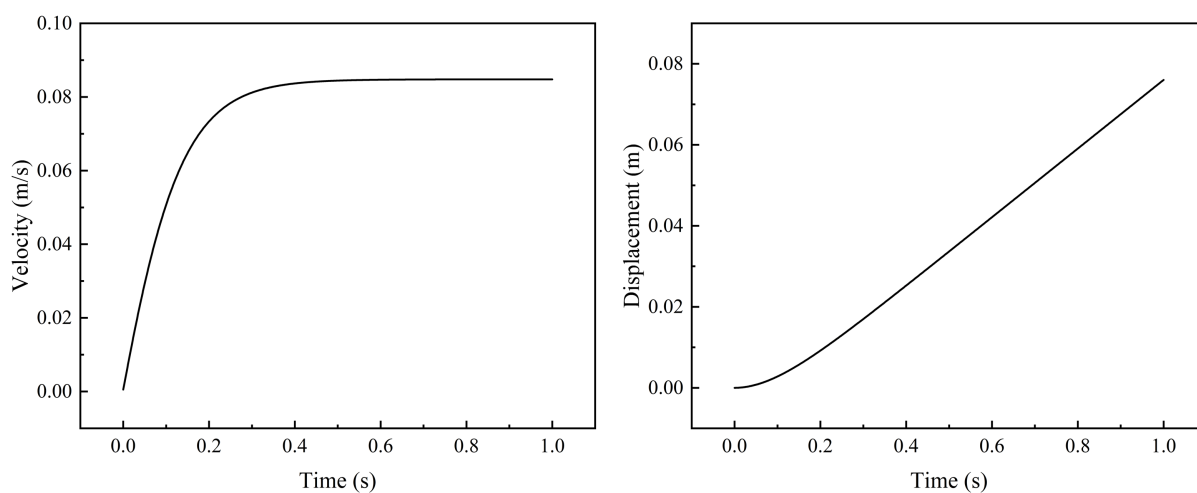


Figure 3. Calculation results of the movement of 4 mm PP particles in water

图 3. 4 mm 的 PP 粒子在水中运动情况计算结果

从图 3 可以看出, 粒子在释放后进行变加速运动, 且只经过不到 1 s 的时间, 其速度就已几乎达到终端速度, 加速过程的位移不到 0.1 m。随后, 粒子在水中进行匀速运动。由于本次实验中液面高度均大于

0.3 m, 因此, 粒子在到达界面时的终端速度理论上与液面高度无关。

表 3 列出了本次实验中部分粒子到达界面时终端速度的实测值及计算得到的理论值。从表中可以看出, 实验中通过测量得到的粒子终端速度与理论计算得到的数据差距不大, 且在不同液面高度下, 同种尺寸的粒子通过测量得到的速度差距也较小。考虑到可能存在的各种误差, 可以认为, 实验中粒子的运动规律与理论相符。因此, 在本次实验中, 粒子的终端速度仅与粒子的尺寸和密度有关, 而与实验中的液面高度无关。

**Table 3.** Experimental particles terminal velocities

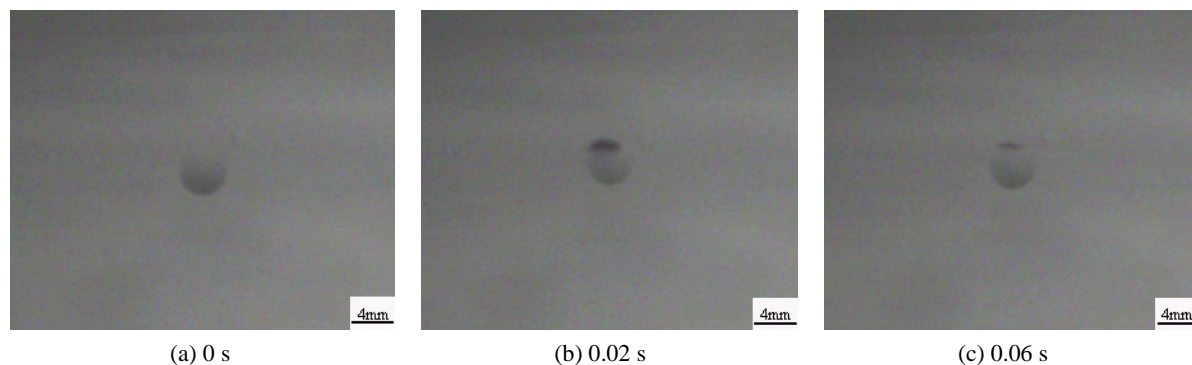
**表 3.** 实验粒子终端速度

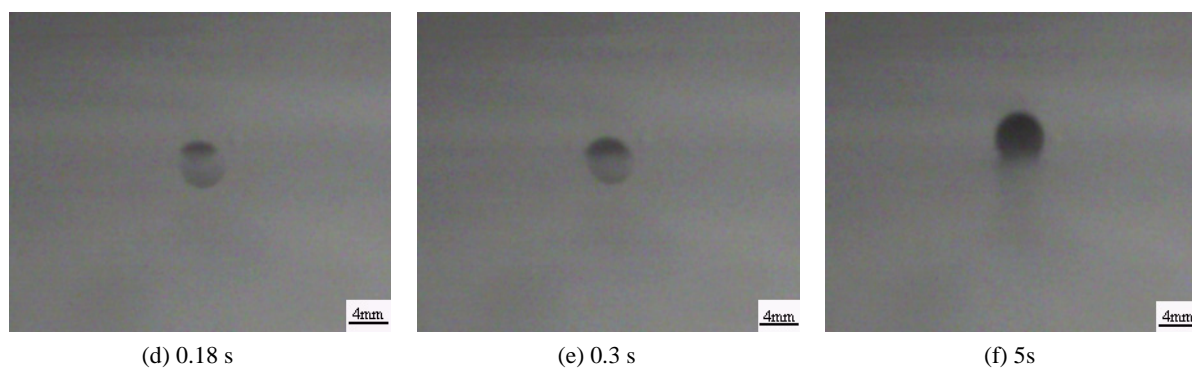
粒子种类	粒子尺寸/mm	液面高度/cm	终端速度实测值/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	终端速度理论值/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
PP	2.36	50	0.059	0.052
PP	3.16	50	0.075	0.069
PP	3.98	50	0.101	0.084
PP	2.36	30	0.050	0.052
PP	3.16	30	0.072	0.069
PP	3.98	30	0.096	0.084
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3.69	50	0.136	0.163

### 3.2. 粒子在水 - 油界面运动情况

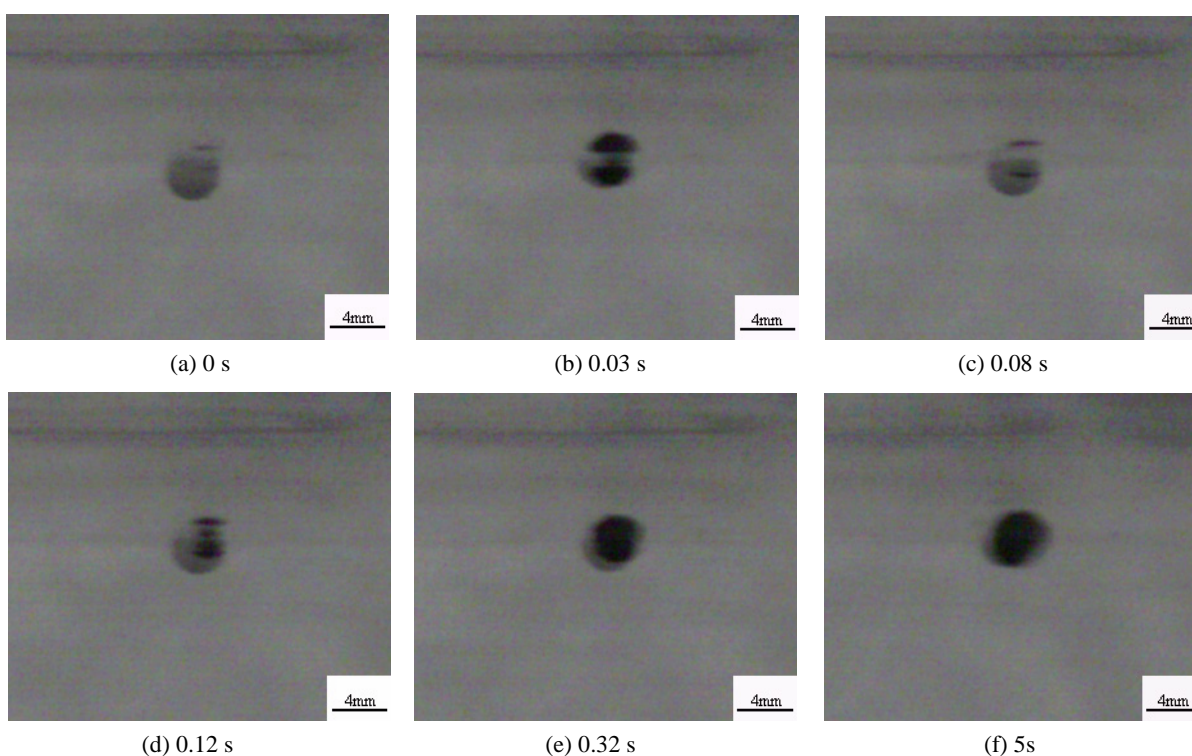
图 4 和图 5 分别为 PP 粒子和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子在水 - 油界面的运动照片。可以看出, 虽然两种粒子的密度均小于油层的密度, 但当它们到达界面时, 均不能直接穿过水 - 油界面。当粒子到达水 - 油界面时, 使界面发生了变形, 由于界面张力的作用, 粒子动能逐渐转化为界面的变形势能。随后, 当粒子到达最高点, 动能全部转化为界面变形势能时, 仍未穿过界面, 并发生了反弹现象。由于浮力的作用, 粒子再次缓慢上浮。此时, 粒子已经没有足够的动能来克服水 - 油界面的变形阻力, 最终停留在了水 - 油界面处。

通过上述分析, 可以看出, 要使粒子顺利穿过水 - 油界面, 需要粒子有足够的初始动能来转化为水 - 油界面的变形势能。当粒子动能大于水 - 油界面变形所需能量时, 则粒子穿越夹杂物后仍保持一定速度进入硅油中, 并上浮至界面。当粒子动能不足以转化为最大界面变形势能时, 粒子则会由于受到界面较大的弹力作用, 发生反弹现象, 并最终将停留在水 - 油界面处。





**Figure 4.** Photograph of the movement process of PP particles at the water-oil interface  
**图 4.** PP 粒子在水 - 油界面的运动过程照片



**Figure 5.** Photograph of the movement process of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles at the water-oil interface  
**图 5.**  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子在水-油界面的运动过程照片

### 3.3. 粒子穿过水 - 油界面的影响因素

本节中粒子的位移均为无量纲位移，粒子的无量纲位移由粒子的实际位移除以粒子的直径得出。粒子运动的起点均为粒子首次接触水 - 油界面时刻。

#### 3.3.1. 粒子尺寸对穿过水 - 油界面的影响

图 6 是直径为 3.98 mm 的 PP 粒子在 AK100 硅油的水 - 油界面处运动时，其速度和位移随时间的变化关系。从图中可以看出，粒子以终端速度运动至水 - 油界面后，在不到 0.05 s 的时间内，发生反弹运动。随后在界面处进行小幅度的震荡运动并上浮。最后，小球速度减为零，停留在水 - 油界面，最终的无量纲位移为 0.826，这说明粒子最终并未穿过水 - 油界面，还有部分在水 - 油界面以下。本次实验所用

PP 粒子密度小于硅油的密度，若仅从浮力角度看，小球应上浮至硅油表面，然而实际情况却完全不同。由此可知，水 - 油界面性质对粒子的上浮有非常大的影响。

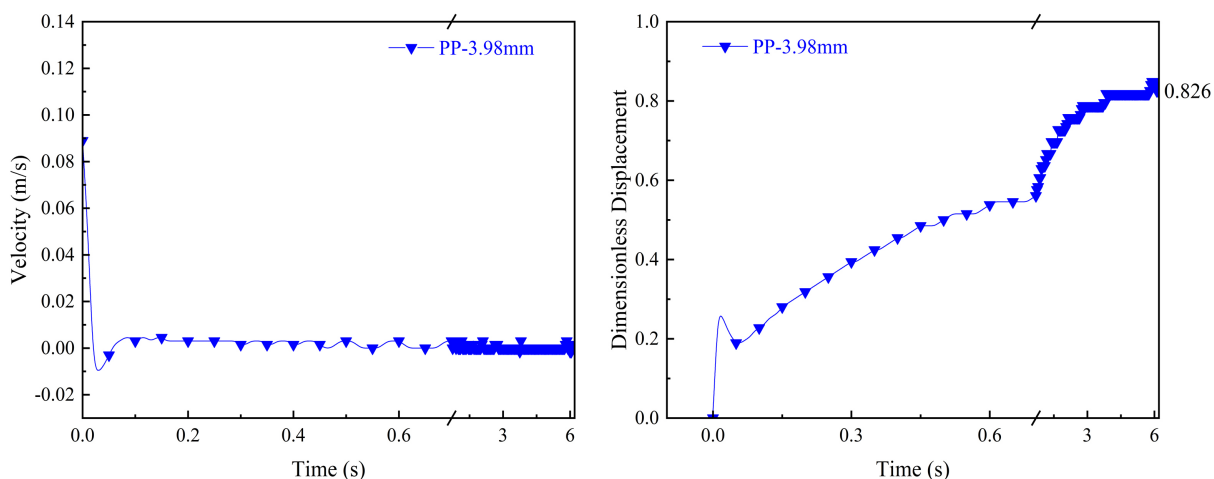


Figure 6. Movement of PP particles with a diameter of 3.98 mm

图 6. 直径 3.98 mm 的 PP 粒子的运动情况

图 7 比较了三种不同尺寸的 PP 粒子水 - 油界面的运动情况。由 3.1 节可知，同种粒子的终端速度仅与粒子尺寸有关，粒子尺寸越大，终端速度越大。从图中可以看出，尺寸较大的粒子由于速度较大，到达界面时有较大的初动能，因而首次进入油层的位移较大。虽然 3.98 mm 的 PP 粒子体积是 2.36 mm 粒子的 4.796 倍，然而，它们的无量纲位移分别为 0.826 和 0.818。两者均未顺利穿过水 - 油界面，且最终位移差距不大，所以尺寸对夹杂物在钢 - 渣界面的最终停留位置影响不大。

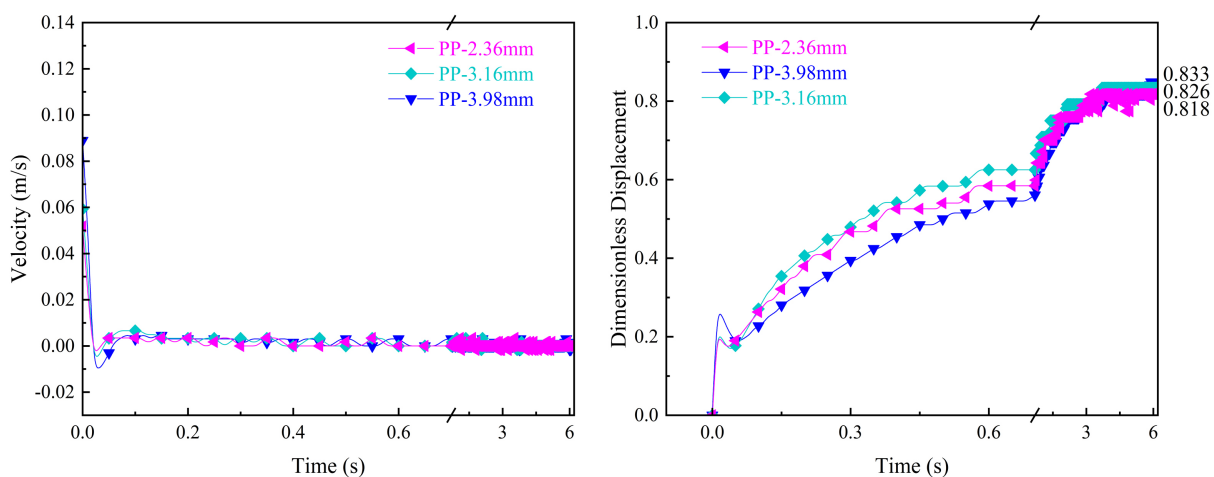


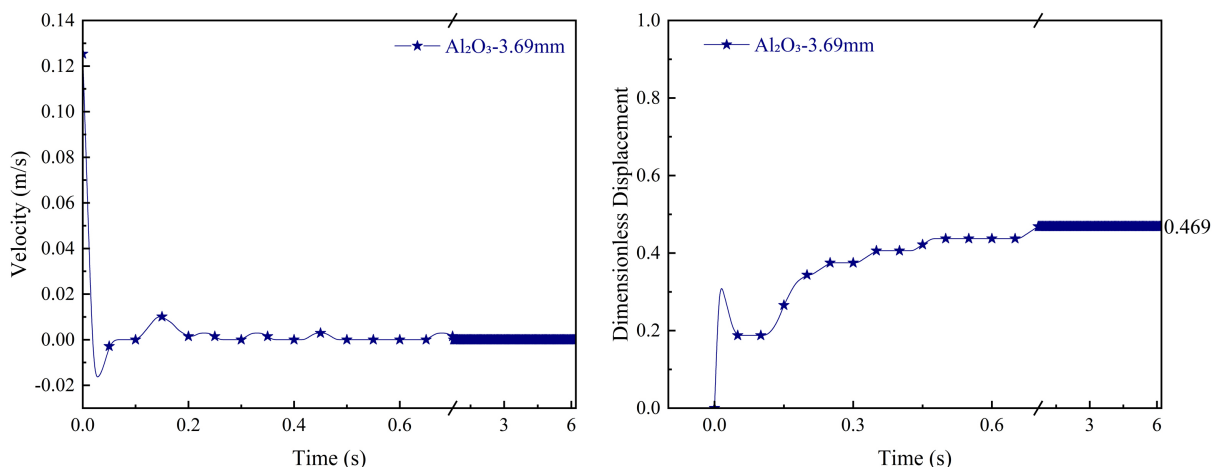
Figure 7. Movement of PP particles of different sizes at the water-oil interface

图 7. 不同尺寸的 PP 粒子在水 - 油界面的运动情况

### 3.3.2. 粒子种类对穿过水 - 油界面的影响

图 8 为直径 3.69 mm 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子在水 - 油界面运动时，其速度和位移随时间的变化关系。从此图可以看到，虽然种类不同，但  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子与 PP 粒子在水 - 油界面处的运动规律非常相似，两者均会在界面处发生反弹，然后缓慢上浮。然而，与 PP 不同的是， $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子最终的无量纲位移仅有 0.469。

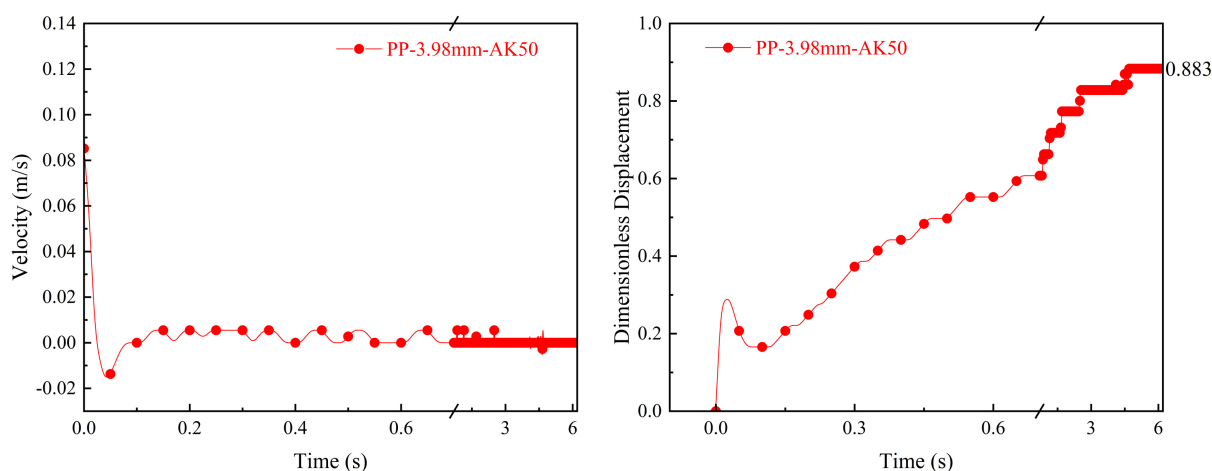




**Figure 8.** Movement of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles with a diameter of 3.69 mm at the water-oil interface

**图 8.** 直径 3.69 mm 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子在水 - 油界面的运动情况

对比图 8、图 9 不同种类的粒子在 AK50 硅油的水 - 油界面的运动情况。可以发现，粒子种类对其穿过程有较大影响。粒子在水 - 油界面发生反弹作用后，PP 粒子的上浮速度明显大于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的上浮速度，且最终位移也大于  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。本次实验所用 PP 粒子的密度大于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子的密度，可以看出密度较大的粒子越容易上浮，且最终停留位置更大。



**Figure 9.** Movement of PP particles with a diameter of 3.98 mm at the water-oil interface

**图 9.** 直径 3.98 mm 的 PP 粒子在水 - 油界面的运动情况

通过分析可知，当粒子到达水 - 油界面时，液固界面间会发生相互作用，产生润湿现象。这种润湿作用会对粒子穿过界面产生重要影响，甚至决定了粒子最终所处位置。当粒子与水 - 油界面越容易润湿时，则粒子越容易穿过界面，进入油层。粒子与界面之间的总润湿性与其接触角  $\theta$  有关，由式(6)，接触角的大小是由各相之间的界面张力直接决定的[19]。

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{ws} - \sigma_{os}}{\sigma_{wo}} \quad (6)$$

式中： $\sigma_{ws}$ ——水 - 粒子之间的界面张力，N/m；

$\sigma_{os}$ ——油 - 粒子之间的界面张力，N/m；

$\sigma_{wo}$ ——水-油之间的界面张力, N/m。

当接触角  $\theta > 90^\circ$  时,  $\cos\theta < 0$ , 则粒子可以被润湿; 当接触角  $\theta < 90^\circ$  时,  $\cos\theta > 0$ , 则粒子不能被润湿。粒子、水和硅油三相之间的界面性质如表 4 [9]所示, 根据表中的数据可以计算得到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子的三相润湿角  $\theta_A \approx 111.45^\circ$ 。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子是亲水疏油的, 而 PP 粒子是亲油疏水的, 同时, 界面张力在亲水(油)性表面上高而在疏水(油)性表面上低, 所以水和 PP 粒子之间的界面张力  $\sigma_{ws}$  更小, 油和 PP 粒子之间的界面张力  $\sigma_{os}$  更大, 所以  $\cos\theta_P < \cos\theta_A$ , 即  $\theta_P > \theta_A \approx 111.45^\circ$ 。根据以上分析, PP 粒子的三相整体润湿性要优于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子, 所以其上浮的最终位移更大。

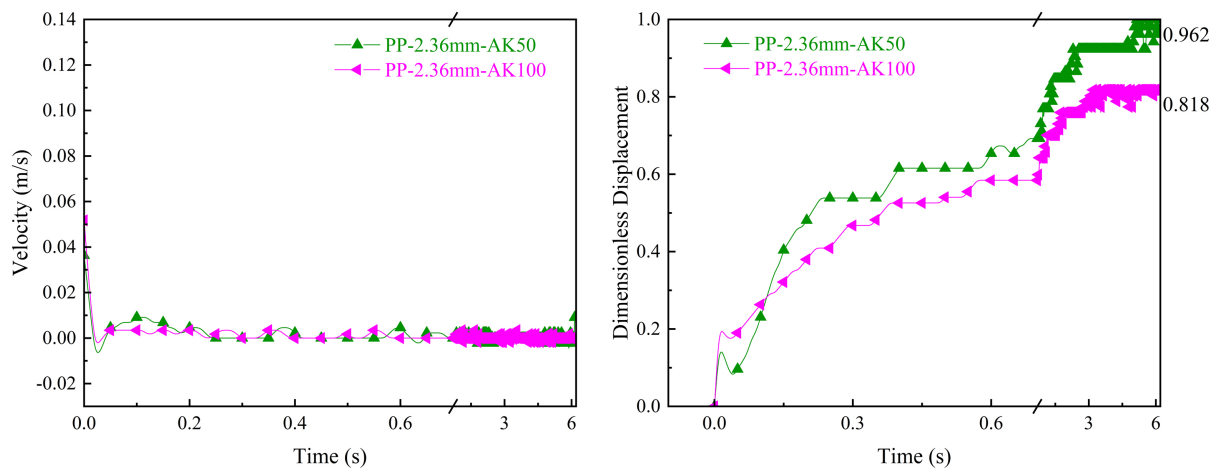
因此, 要使粒子成功穿过水-油界面, 要尽量减小粒子与水之间的界面张力, 同时增大粒子与油层之间的界面张力。在实际生产中, 就要尽量增大夹杂物在钢-渣界面的总润湿性, 从而有利于夹杂物的上浮。

**Table 4.** The data of interfacial tension  
**表 4.** 界面张力数据

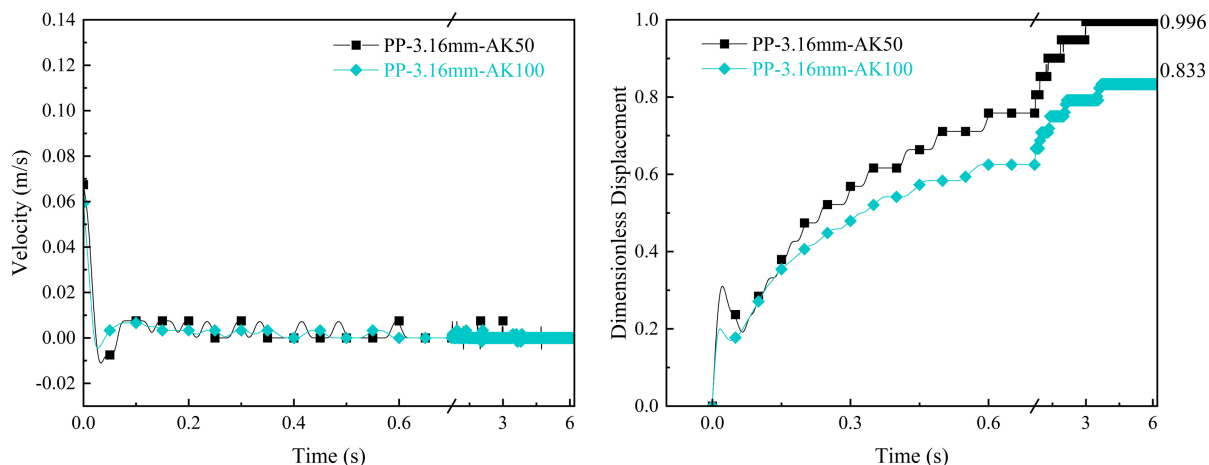
界面张力	数值 N/m
水-油(AK50)	0.041
PP-水	-
PP-油(AK50)	-
$\text{Al}_2\text{O}_3$ -水	0.614
$\text{Al}_2\text{O}_3$ -油(AK50)	0.629

### 3.3.3. 油层黏度对穿过水-油界面的影响

图 10~12 展示了在不同硅油的情况下, 粒子在水-油界面的运动情况。从图中可以看出, 当硅油为 AK50 时, 粒子最终位移略大于硅油为 AK100 时的位移。由于 AK100 的黏度为 AK50 的两倍, 而两者密度差距不大, 说明油层黏度增大, 将使粒子在界面的最终位移减小。通过分析可知, 当油层黏度越大时, 粒子在水-油界面上浮过程中受到的黏性阻力越大, 则粒子上浮速度越小, 越不利于其上浮。同时, 根据周业连等[6]人的研究, 油层黏度对粒子在水-油界面的最终停留位置影响不大, 只会减缓其在界面上浮的速度。结合 3.3.2 节对不同种类粒子在水-油界面的运动情况的分析, 油层黏度对粒子的运动情况的影响明显小于粒子与水-油界面润湿性的影响。

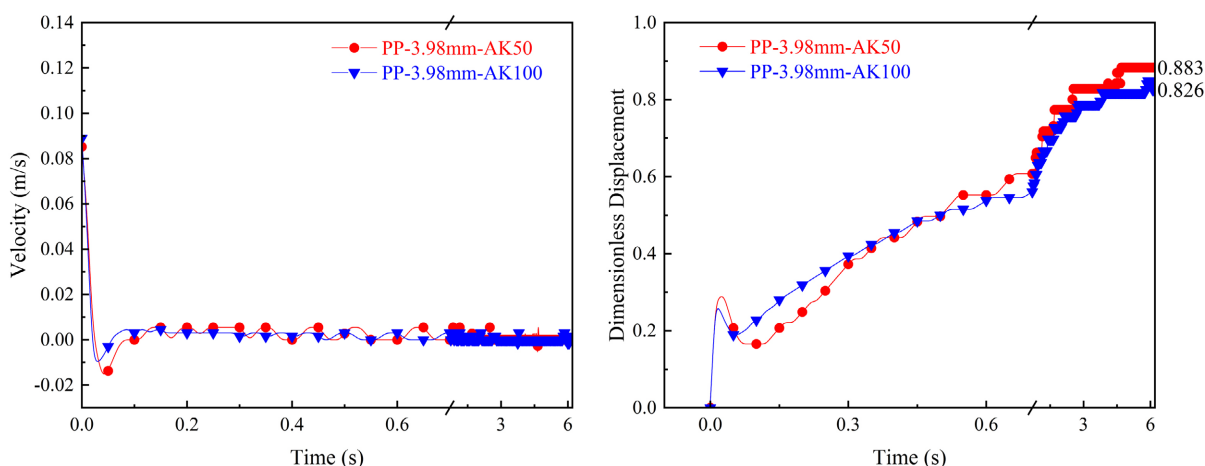


**Figure 10.** Movement of PP particles with a diameter of 2.36 mm at different water-oil interfaces  
**图 10.** 直径 2.36 mm 的 PP 粒子在不同水-油界面的运动情况



**Figure 11.** Movement of PP particles with a diameter of 3.16 mm at different water-oil interfaces

**图 11.** 直径 3.16 mm 的 PP 粒子在不同水 - 油界面的运动情况



**Figure 12.** Movement of PP particles with a diameter of 3.98 mm at different water-oil interfaces

**图 12.** 直径 3.98 mm 的 PP 粒子在不同水 - 油界面的运动情况

#### 4. 结论

本次实验基于相似原理建立了非金属夹杂物在渣层运动上浮的水模型，通过比较不同粒子在不同水 - 油界面的运动情况，分析各因素对粒子在水 - 油界面运动过程的影响，得出结论如下：

1) 在静止的水中，粒子释放后，立即加速运动上浮，并在较短时间内达到终端速度，随后匀速到达水 - 油界面。当粒子到达水 - 油界面时，其动能逐渐转化为水 - 油界面的界面变形势能。由于本次实验中两种粒子的动能均过小，无法克服界面最大变形势能，会受到界面的弹力作用，出现反弹现象。随后，粒子由于浮力的作用在水 - 油界面缓慢上浮，最终停留在水 - 油界面。

2) 在同种硅油 AK50 的情况下， $\text{Al}_2\text{O}_3$  粒子的最终无量纲位移约为 0.5，而 PP 粒子的无量纲位移约为 0.9，说明粒子所受浮力对其在界面的运动过程的影响较小，主要的影响因素是粒子与界面间的总润湿性，且密度较大的更容易在界面上浮。

3) 对同种 PP 粒子，在硅油黏度为 0.048 Pa·s 时的无量纲位移约为 0.9，而硅油黏度为 0.096 Pa·s 时的无量纲位移约为 0.8，说明油层的黏度也对粒子穿越过程有一定影响。油层黏度越大，对粒子在水 - 油界面运动的阻力越大，从而延缓粒子穿越过程。但油层黏度对粒子最终位置的影响不大。

4) 在粒子种类及界面性质一定的情况下, 当粒子由于动能过小而无法顺利穿过水-油界面时, 主要受到的是界面张力的影响, 其最终在界面处的停留位置与粒子尺寸无关。

## 基金项目

感谢山西省应用基础研究计划青年基金(201901D211013)、山西省科技重大专项(20191102004)、太原理工大学大学生创新创业计划项目(22100)为本研究提供资助。

## 参考文献

- [1] 张爱梅. 非金属夹杂物对钢性能的影响[J]. 物理测试, 2006, 24(4): 42-44.
- [2] Wikström, J., Nakajima, K., Jonsson, L. and Jönsson, P. (2008) Application of a Model for Liquid Inclusion Separation at a Steel-Slag Interface for Laboratory and Industrial Situations. *Steel Research International*, **79**, 826-834. <https://doi.org/10.1002/srin.200806206>
- [3] Chen, C., Ni, P.Y., Jonsson, L.T.I., Cheng, G.G. and Jönsson, P.G. (2016) A Model Study of Inclusions Deposition, Macroscopic Transport, and Dynamic Removal at Steel-Slag Interface for Different Tundish Designs. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **47**, 1916-1932. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0637-6>
- [4] 刘威, 杨树峰, 李京社. 钢-渣界面非金属夹杂物运动行为研究进展[J]. 工程科学学报, 2021, 43(12): 1647-1655.
- [5] Zhou, Y.L., Deng, Z.Y. and Zhu, M.Y. (2017) Study on the Separation Process of Non-Metallic Inclusions at the Steel-Slag Interface Using Water Modeling. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, **24**, 627-637. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1445-y>
- [6] 周业连, 邓志银, 朱苗勇. 固/液态夹杂物穿过钢渣界面的分离机理[J]. 过程工程学报, 2018, 18(1): 96-102.
- [7] 周业连, 邓志银, 朱苗勇. 非球形固态夹杂物穿过钢-渣界面行为研究[J]. 过程工程学报, 2022, 22(2): 222-231.
- [8] 孙丽媛. 非金属夹杂物在钢渣界面的去除行为研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2013.
- [9] 刘超. 钢渣界面夹杂物分离去除的理论研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2014.
- [10] 刘超, 李京社, 孙丽媛, 等. 上浮速度对钢渣界面夹杂物去除的影响[J]. 特殊钢, 2014, 35(5): 5-7.
- [11] Liu, C., Yang, S.F., Li, J.S., Zhu, L.B. and Li, X.G. (2016) Motion Behavior of Nonmetallic Inclusions at the Interface of Steel and Slag. Part I: Model Development, Validation, and Preliminary Analysis. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **47**, 1882-1892. <https://doi.org/10.1007/s11663-016-0605-1>
- [12] Yang, S.F., Li, J.S., Liu, C., Sun, L.Y. and Yang, H.B. (2014) Motion Behavior of Nonmetallic Inclusions at the Interface of Steel and Slag. Part II: Model Application and Discussion. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **45**, 2453-2463. <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0147-3>
- [13] 朱苗勇, 魏国, 储满生. 现代冶金工艺学: 钢铁冶金卷[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 277.
- [14] 沈巧珍, 杜建明. 冶金传输原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 331.
- [15] 毛裕文. 冶金熔体[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994: 52.
- [16] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 304.
- [17] 王文豪, 吴复忠, 高雯雯. 液态钢渣的物理化学性质[J]. 现代机械, 2009(6): 91-93.
- [18] 杨宏博. 夹杂物穿越钢渣界面过程运动行为研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- [19] 周业连, 邓志银, 朱苗勇. 钢-渣界面液态夹杂物分离过程数值模拟[J]. 钢铁, 2018, 53(7): 31-37.