

渣层对钢包中废钢运动及熔化影响的水模研究

杨士舜, 朱江俊, 辛毓杰, 曹瑞云, 杨康, 郭永博, 陈超*

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7日; 录用日期: 2022年8月3日; 发布日期: 2022年8月11日

摘要

废钢铁是可循环利用的绿色再生资源, 提高废钢比有利于节约能源, 减少碳排放, 对钢铁工业实现碳中和具有重要意义。近年来, 各大企业在炼钢环节加大废钢的使用量。但废钢在精炼钢包中的熔化机理以及渣层对废钢运动熔化的影响仍然不明确。本文通过水模型实验, 基于相变数原理使用冰球来模拟废钢, 不同黏度的硅油用于模拟渣层, 研究了渣层和吹气搅拌强度对冰样的运动、融化以及形貌变化的影响。结果表明, 冰球在无渣条件下其融化过程中形貌基本保持球状; 在有渣条件下, 冰球在其不同介质中的融化快慢有差异, 导致其形貌呈不规则柱状。渣层黏度越大, 冰球在液面的运动较慢。渣层黏度对冰球的融化时间无明显影响规律, 但有渣层时融化时间低于无渣条件下。吹气流量增加后, 渣眼面积有所增加, 冰球的融化时间有所下降。

关键词

钢包, 废钢, 渣层, 运动, 熔化, 水模型

Water Model Study on the Effect of Slag Layer on the Motion and Melting of Scrap Steel in Ladle

Shishun Yang, Jiangjun Zhu, Yujie Xin, Ruiyun Cao, Kang Yang, Yongbo Guo, Chao Chen*

College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi

Received: Jul. 7th, 2022; accepted: Aug. 3rd, 2022; published: Aug. 11th, 2022

Abstract

Scrap steel is a green renewable resource that can be recycled. Increasing the scrap ratio is bene-

*通讯作者。

文章引用: 杨士舜, 朱江俊, 辛毓杰, 曹瑞云, 杨康, 郭永博, 陈超. 渣层对钢包中废钢运动及熔化影响的水模研究[J]. 冶金工程, 2022, 9(3): 170-180. DOI: 10.12677/meng.2022.93022

facial to saving energy and reducing carbon emissions, which is of great importance to realizing carbon neutralization in the iron and steel industry. In recent years, many plants have increased the use of scrap in steelmaking. However, the melting mechanism of scrap in refining ladle and the influence of the slag layer on the motion and melting of scrap are still unclear. In this paper, based on the principles of similarities of phase transformation number, the ice sphere is used to simulate steel scrap. Besides, the silicone oil with different viscosity is used to simulate the slag layer. In the experiment, the effects of slag layer and gas stirring intensity on the motion, melting and morphology evolution of ice samples were studied. The results showed that the morphology of ice spheres remained spherical during melting in the case without slag. For the cases with the slag layer, the melting rate of ice spheres in different fluids is different, resulting in irregular columnar morphology of ice. The larger the viscosity of the slag layer is, the slower the ice sphere moves on the liquid surface. The viscosity of the slag layer has no obvious effect on the melting time of the ice sphere, but the melting time in the case with the slag layer is lower than that in the case without slag. With the increase of gas flow rate, the slag eye area increases, and the melting time of the ice sphere decreases.

Keywords

Ladle, Scrap, Slag Layer, Motion, Melting, Water Model

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

随着钢铁工业的发展, 废钢积蓄量逐年增加, 2020 年我国钢铁行业废钢消耗量为 2.326 亿吨[1]。多用 1 吨废钢可减少约 1.6 吨碳排放[2], 加强废钢铁的综合利用, 将是钢铁工业减少碳排放量的重要途径之一。越来越多的企业在炼钢环节加大废钢的使用量, 提高废钢比。除了转炉和电炉以外, 有企业报道了在钢包中加入废钢的实际案例[3], 但受制于钢包热源和冶炼周期, 钢包中废钢快速熔化的机理仍有待深入研究。

Penz 和 Schenk [4]从传热与传质的角度总结了废钢熔化理论的研究现状。目前, 研究废钢熔化主要有冷态实验、热态实验、数值模拟等方法。但实际钢包精炼及废钢熔化过程难以直接观测, 可以采用相似原理使用水模型进行研究。已有大量研究者[5]-[15]研究了冰的传热与传质以及使用冰来模拟冶金过程中的熔化现象。其中, Szekely 等人[6]研究了固定冰柱在湍流场下的熔化速率, 考察了冰柱在流场中不同位置的熔化速率变化, 并得出了冰柱熔化在停滞区域及湍流区域里的熔化规律。刘越生等人[8] [9]运用转炉炼钢水模型实验, 借助于冰块以模拟废钢的熔化过程, 并通过计算整个熔池的热平衡和质量平衡分析研究了冰块的形状和大小、底吹气量以及顶吹供热流量对冰块熔化速率的影响。成国光等人[10]使用冰块模拟废钢, 利用水模型实验研究了电弧炉内吹气搅拌功率对废钢熔化速率的影响。Shukla 等人[11]研究了不同形状的冰样在水浴中的熔化过程, 并结合相变数的概念, 考虑了不同吹气流量和温度下冰样直径变化, 得出了在此系统下传热与传质公式中常数的值。Cao 等人[12]用掺混石英砂的冰块模拟废钢, 结合水模型实验与数值模拟, 研究了不同形状和大小的冰块在转炉水模型中的融化规律。Xi 等人[13]通过水模型实验, 使用冰模拟废钢研究了电弧炉内废钢熔化过程, 并建立数学模型, 得出吹气方式, 冰样形状与冰样融化时间的关系。杨荣旺等[14]和裴康华等[15]研究了底部强搅拌反应器中废钢的运动、熔化及混匀机理。然而, 使用冰类比研究精炼炉中废钢的熔化报道较少。

在精炼钢包中，渣层会对底吹氩气搅拌钢包内钢液的流动、渣眼的形成产生影响[16]，从渣眼加入合金，可以避免其与熔渣接触，但轻质废钢加入钢包后不会立即熔化，在渣层和钢液之间漂浮，直至熔化。综上，渣层对精炼钢包中废钢的运动及融化的影响仍然不明确。

本文通过水模型实验，基于相变数原理使用冰球来模拟废钢，使用不同黏度的硅油用于模拟渣层，研究了渣层和吹气搅拌强度对冰样运动、融化以及形貌变化的影响，为优化废钢在钢包精炼炉中的熔化提供参考依据。

2. 水模型实验

2.1. 实验原理

本实验中使用的水模型尺寸参数是基于某厂的 260 t 钢包原型，根据相似原理 1:8 制作而成。本文在设计钢包时采用修正弗鲁德准数相似：

$$Fr'_m = Fr'_p \tag{1}$$

$$Fr' = \frac{\rho_g U^2}{\rho_l g H} \tag{2}$$

$$U = \frac{4Q}{\pi d^2} \tag{3}$$

$$Q_m = \left[\frac{\rho_{gp}}{\rho_{gm}} \times \frac{\rho_{lm}}{\rho_{lp}} \times \left(\frac{d_m}{d_l} \right)^4 \times \frac{H_m}{H_p} \right]^{\frac{1}{2}} Q_p \tag{4}$$

式中： Fr' 为修正的弗鲁德准数； U 为气体的特征速度； ρ_g 、 ρ_l 分别表示气体和液体的密度； g 为重力加速度； H 为熔池高度； Q 为吹气量； d 为透气砖直径； p 表原型钢包； m 代表水模型。

在确定水模型中气体流量的同时，还必须确定渣金界面的相似条件。通过量纲分析可知，为了模拟渣和钢水的流动情况，模拟所用的介质应满足以下条件：

$$\frac{\mu_{渣层}}{\mu_{钢液}} = \frac{\mu_{油}}{\mu_{水}} \tag{5}$$

$$\frac{\rho_{渣层}}{\rho_{钢液}} = \frac{\rho_{油}}{\rho_{水}} \tag{6}$$

上式下标代表模拟钢水和炉渣所采用的介质。在本实验中采用“水 - 硅油”体系模拟“钢液 - 渣层”体系，实验参数如表 1 所示。

Table 1. Physical parameters of prototype and model media

表 1. 原型与模型介质物理参数

参数	钢液	渣	水	硅油 1	硅油 2	硅油 3
温度, °C	1600	1400~1500	25	25	25	25
密度, kg·m ⁻³	7 × 10 ³	3.5 × 10 ³	1 × 10 ³	0.96 × 10 ³	0.969 × 10 ³	0.970 × 10 ³
动力粘度, Pa·s	5 × 10 ⁻³	30~1000 × 10 ⁻³	1.01 × 10 ⁻³	48 × 10 ⁻³	337 × 10 ⁻³	963 × 10 ⁻³

废钢的熔化过程受废钢与熔池间传热所影响，本文基于 Shukla 等[11]提出的相变数(Ph)作为水模型研究废钢熔化的依据。Ph 数的表达式如下：

$$Ph = \frac{\Delta H}{(C_{ps} \cdot \Delta T)} \quad (7)$$

式中, ΔH 是熔化潜热, J/kg; C_{ps} 是固体比热, J/(kg·K); ΔT 是过热度, K。由 Ph 数可得, 当冰球过热度为 25 K 时, 可对应的废钢过热度为 55 K [14]。

2.2. 实验装置与方案

本次实验中使用的水模型尺寸参数是基于某厂的 260 t 钢包原型, 根据相似原理 1:8 制作而成。水模型实验装置示意图如图 1 所示, 该实验装置主要由钢包水模型, 空气压缩机, 测温装置, 摄像机组成。图 2 为水模型参数, 高 700 mm, 直径为 480 mm, 吹气孔位于 0.58 半径处, 液面高度为 420 mm。

测温探头安装在钢包水模型容器远离吹气孔一侧的壁面中部, 并连接电子测温仪实时监测水温; 通过空压机向容器内通入压缩空气以达到底吹气体搅拌目的; 使用摄像装置记录冰球的运动及融化过程, 并用秒表记录冰球的融化时间。

本研究采用水模型实验用冰球模拟废钢, 使用硅油模拟渣层, 以此模拟研究废钢在气-液-渣多相流钢包中的运动及融化过程, 研究不同粘度的硅油以对应不同粘度的炉渣。钢包水模型内的水温为 25℃, 渣层厚度为 5 mm。研究了不同的粘度和吹气流量的条件下冰样的运动、融化机理, 以及融化过程中的形貌变化。具体实验条件参数如表 2 所示。

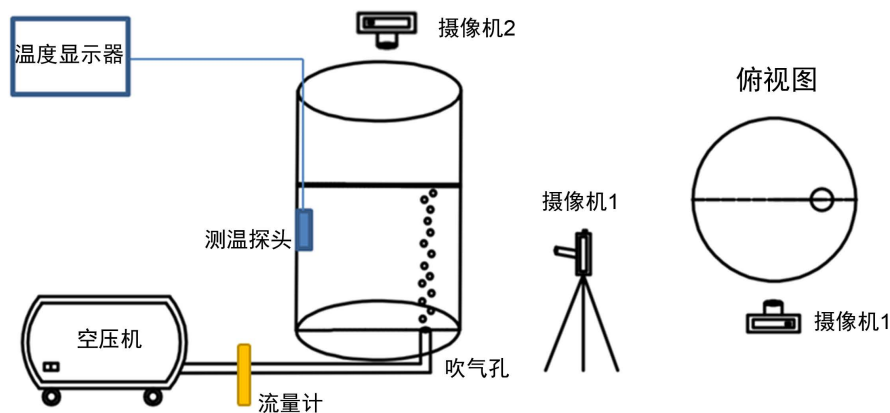


Figure 1. Schematic diagram of water model experiment setup

图 1. 水模型实验装置示意图

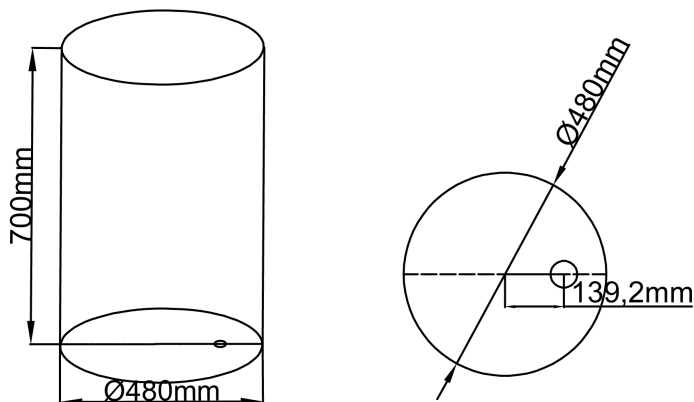


Figure 2. Parameter of water model of ladle furnace

图 2. 钢包水模型参数图

Table 2. Parameters of water model experiment
表 2. 水模型实验参数

参数	水模型条件
钢包直径(mm)	480
液面高度(mm)	420
透气塞数量	1
透气塞径比位置(r/R)	0.58
水温(°C)	25 ± 0.1
冰球的直径(mm)	50
冰球加入位置	吹气孔正上方
渣层厚度/(mm)	5
吹气流量(Nl/min)	0.5、1
渣层黏度(Pa·s)	0.048、0.337、0.963

3. 实验结果

3.1. 水模型“气-液-渣”界面形貌

如图 3 为渣层粘度 0.048 pa·s 时, 不同吹气流量下水模型“气-液-渣”系统界面的形貌照片。如图所示, 底吹气体从底部上升至液面会在钢包水模型油-水界面相透过形成一个渣眼, 且吹气流量越大, 渣眼面积越大。

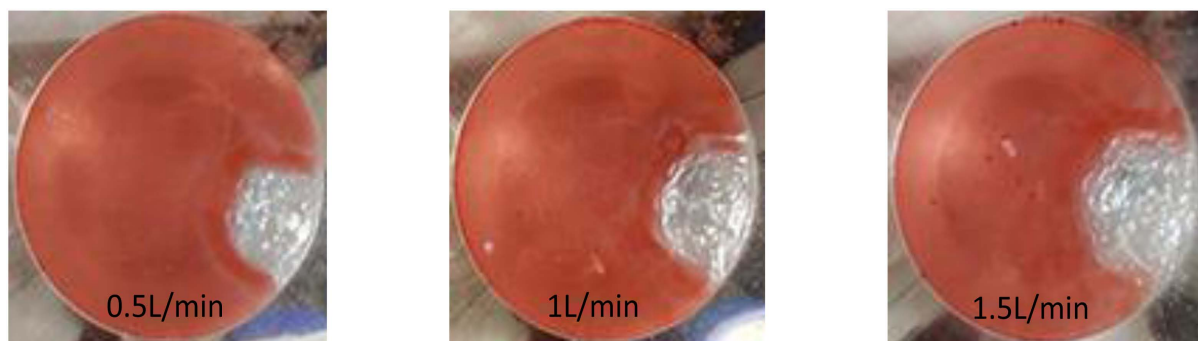


Figure 3. Photos of slag eyes under different gas flow rates
图 3. 不同吹气流量下渣眼照片

3.2. 轻质废钢的水模型模拟结果

3.2.1. 无渣层条件下冰球的运动与融化形貌变化

在无渣层条件下, 对视频中冰球运动位置进行记录, 其典型运动照片如图 4 所示, 将冰球在垂直于渣眼上方的位置加入, 在自身重力作用下冰球会先下降一段距离, 之后随羽流区上升流和浮力作用下重新上升回到液面, 最后, 气泡羽流在液面形成的水平流会推动冰球运动至远离羽流眼的另一侧融化。

在无渣层条件下,每隔 20 秒记录一次冰球形貌,冰球的融化过程典型形貌变化如图 5 所示。冰球在液面小范围内运动,随液面波动而运动,融化过程中基本保持球状。

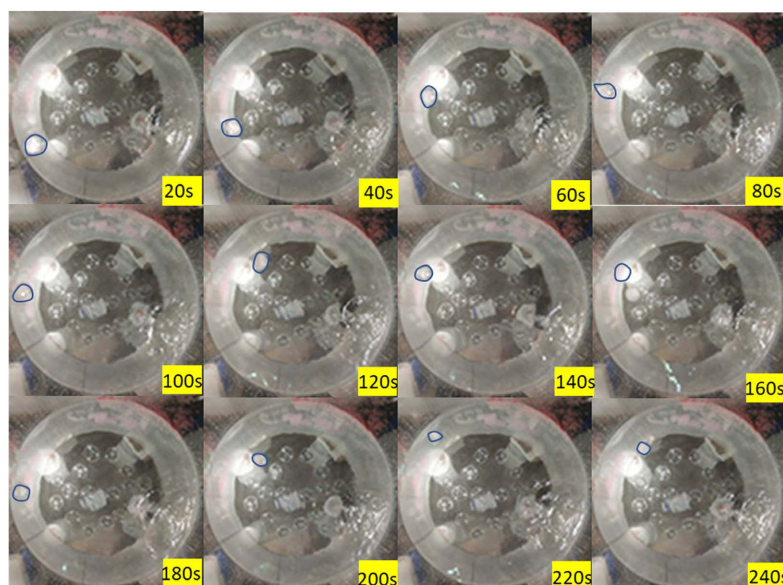


Figure 4. Photo of motion and melting of ice sphere under the conditions of gas flow rate of 1 L/min and without slag layer
图 4. 无渣层且吹气流量为 1 L/min 条件下冰球典型运动及融化照片

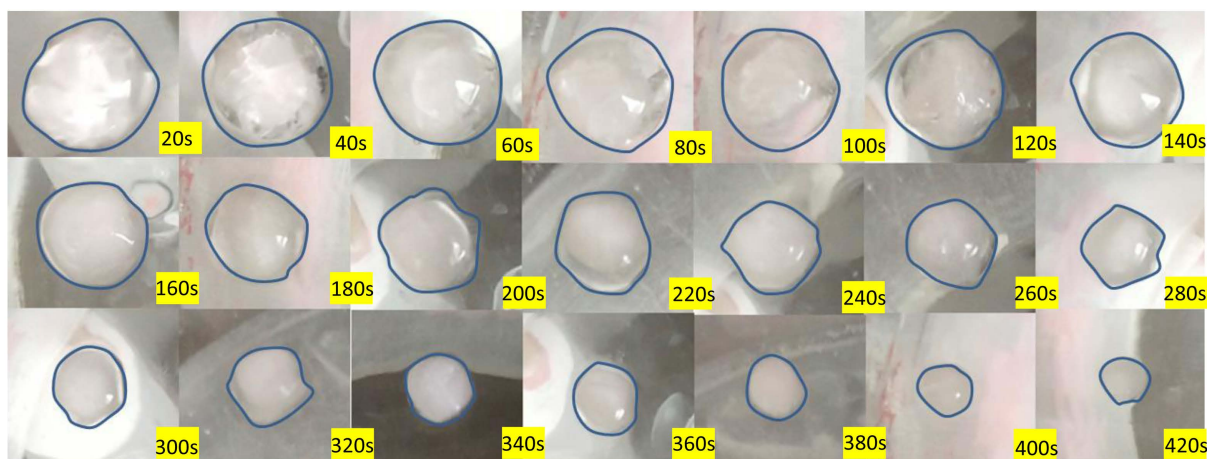


Figure 5. Photos of typical melting morphology of ice sphere under the gas flow rate of 1 L/min and without slag layer
图 5. 在无渣层且吹气流量为 1 L/min 条件下冰球的典型融化形貌变化照片

3.2.2. 有渣层条件下冰球的运动与融化形貌变化

在有渣层的条件下,将冰球在垂直于渣眼上方的位置加入后,冰球后首先会在自身重力作用下会下降一段距离,随后在羽流区上升流和浮力作用下上升到渣眼区域,之后在气泡羽流的推动下进入油层,最后在油-水界面漂浮并缓慢融化。由于渣层对冰球的运动有一定阻力,冰球在油-水界面的运动比较缓慢。图 6 为渣层粘度为 0.048 pa·s 下,吹气流量分别为 0.5 L/min、1 L/min 时冰球的典型运动融化照片。其运动轨迹示意图如图 7 所示,0.5 L/min 情况下,冰球从渣眼上部沿圆柱形容器的上侧壁面运动且融化,如示意图中轨迹 1;1 L/min 情况下是从渣眼下部沿圆柱形容器的下侧壁面运动且融化,如示意图轨迹 2。

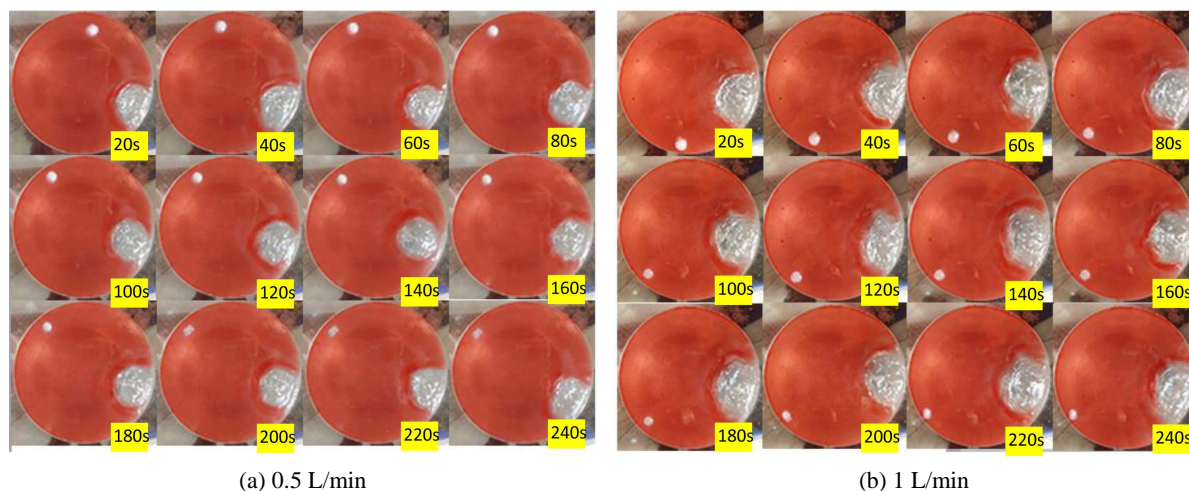


Figure 6. Photos of motion and melting of ice sphere under the conditions of oil viscosity of 0.048 pa·s and gas flow rate of 0.5 L/min and 1 L/min

图 6. 油粘度 0.048 pa·s 下吹气流量分别为 0.5 L/min 和 1 L/min 条件下冰球的运动及融化照片

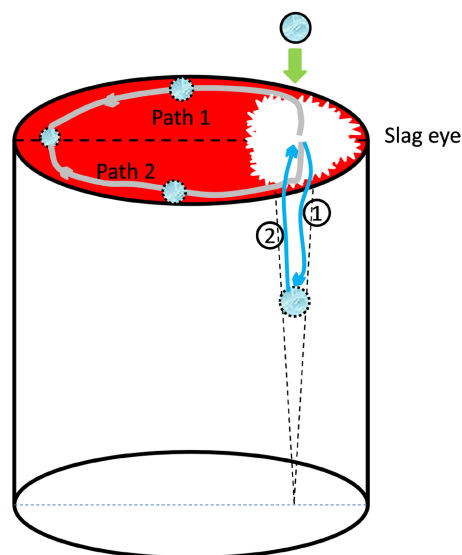


Figure 7. Schematic diagram of motion trajectory

图 7. 运动轨迹示意图

在渣层粘度为 0.337 pa·s 条件下，当吹气流量为 0.5 L/min 和 1 L/min 时的典型运动融化照片分别如图 8、图 9 所示，当渣层粘度为 0.337 pa·s 时，在吹气流量为 0.5 L/min 条件下，冰球加入 20 秒后运动至距中轴线靠近壁面附近，当吹气流量增大到 1 L/min 时，冰球加入 20 秒后运动至中轴线靠近壁面一侧，距渣眼更近一些。相对于 0.048 pa·s 条件下冰球的运动过程，通过观察可知，在相同流量下，其运动较 0.048 pa·s 情况下均更缓慢一些。

在渣层粘度为 0.963 pa·s 条件下，当吹气流量为 0.5 L/min 和 1 L/min 时的典型运动融化照片分别如图 10、图 11 所示，在气柱作用下，当吹气流量为 0.5 L/min 时，冰球加入 20 秒后运动至距中轴线二分之一处且靠近于壁面一侧，当吹气流量增大到 1 L/min 时，冰球加入 20 秒后运动至距中轴线三分之二且靠近壁面处；与上述渣层粘度为 0.048 pa·s 及 0.337 pa·s 情况进行对比，可以看出该粘度下冰球运动距渣眼最近，且随着油层粘度的增大，渣层的阻力增大，冰球运动越缓慢。

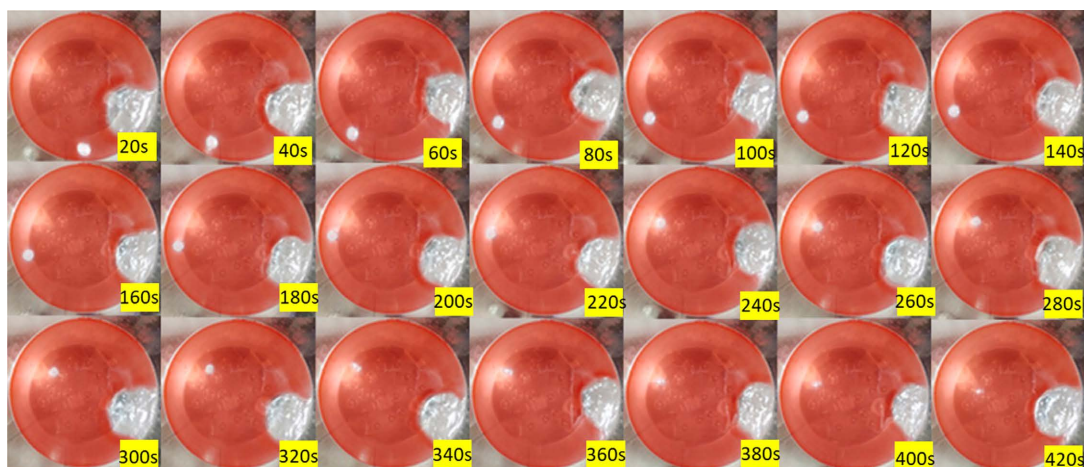


Figure 8. Photos of motion and melting of ice sphere under the conditions of oil viscosity of 0.337 pa·s and gas flow rate of 0.5 L/min

图 8. 油粘度为 0.337 pa·s 下吹气流量为 0.5L/min 条件下冰球的运动及融化照片

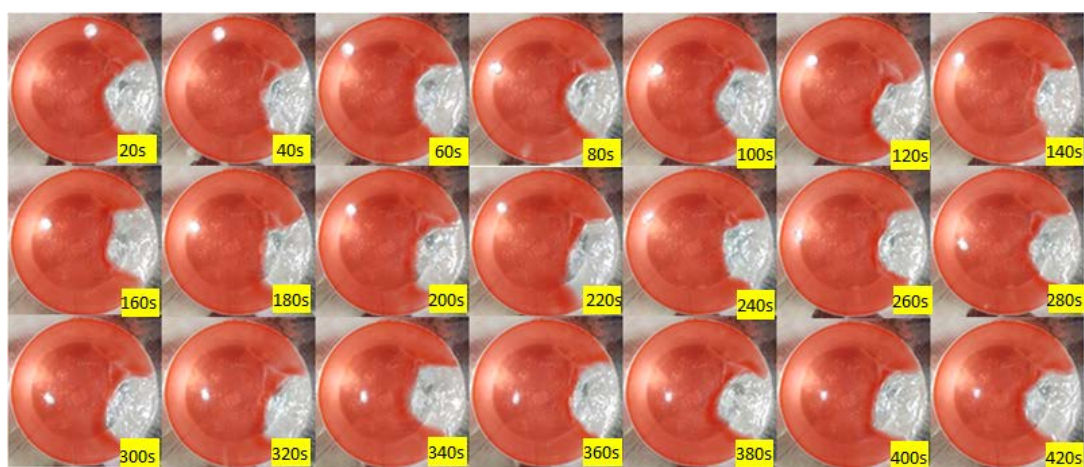


Figure 9. Photos of motion and melting of ice sphere under the conditions of oil viscosity of 0.337 pa·s and gas flow rate of 1 L/min

图 9. 油粘度为 0.337 pa·s 下吹气流量为 1 L/min 条件下冰球的运动及融化照片

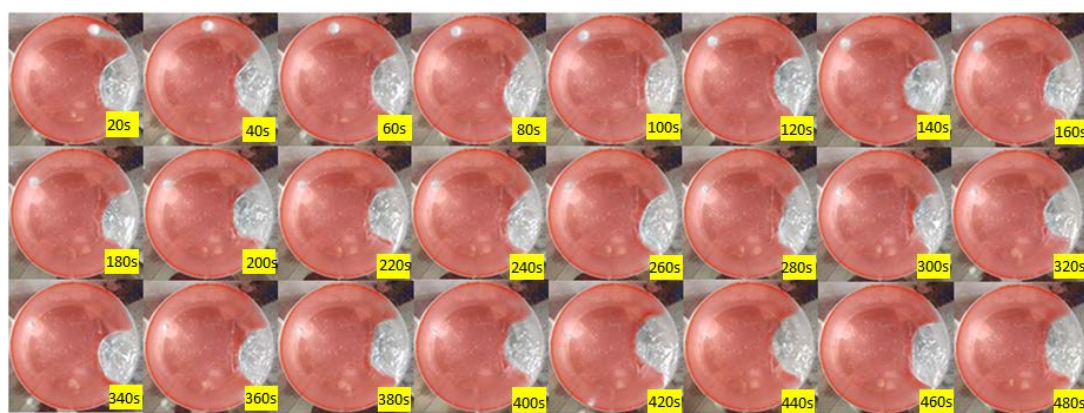


Figure 10. Photos of motion and melting of ice sphere under the conditions of oil viscosity of 0.963 pa·s and gas flow rate of 0.5 L/min

图 10. 油粘度为 0.963 pa·s 下吹气流量为 0.5 L/min 条件下冰球的运动及融化照片

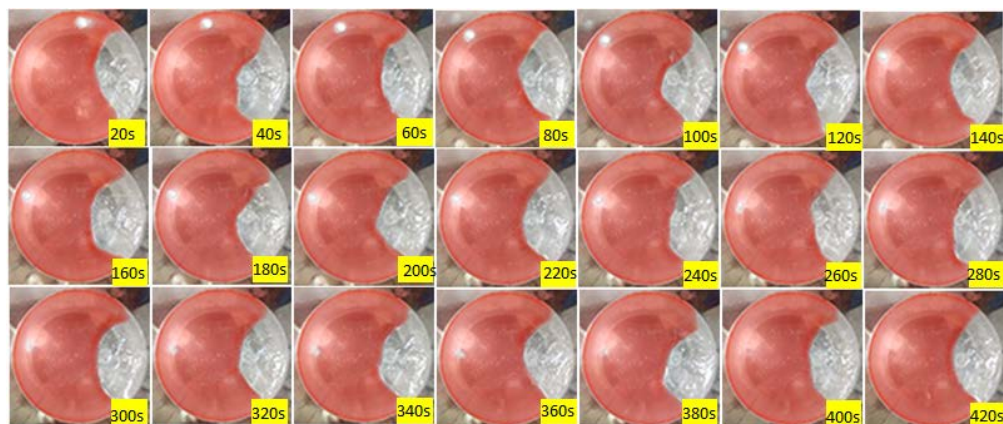


Figure 11. Photos of motion and melting of ice sphere under the conditions of oil viscosity of 0.963 pa·s and gas flow rate of 1 L/min

图 11. 油粘度为 0.963 pa·s 下吹气流量为 1 L/min 条件下冰球的运动及融化照片

在有渣层条件下，冰球的典型融化形貌变化如图 12 所示，每隔 20 秒记录一次冰球形貌，在水模型钢包内，冰球在水中的融化速度大于在油层中的融化速度，如图中显示，从顶部来看，冰球在 300 s 前呈球形，当其融化 300 s 之后发生了 90° 的翻转，随后，翻转后的冰球在油 - 水界面呈不规则柱状直至完全融化。这是因为冰球在不同融化介质中的融化速率不一样，其在油层中融化要慢于在水中，导致冰球呈上粗下细的蘑菇状。

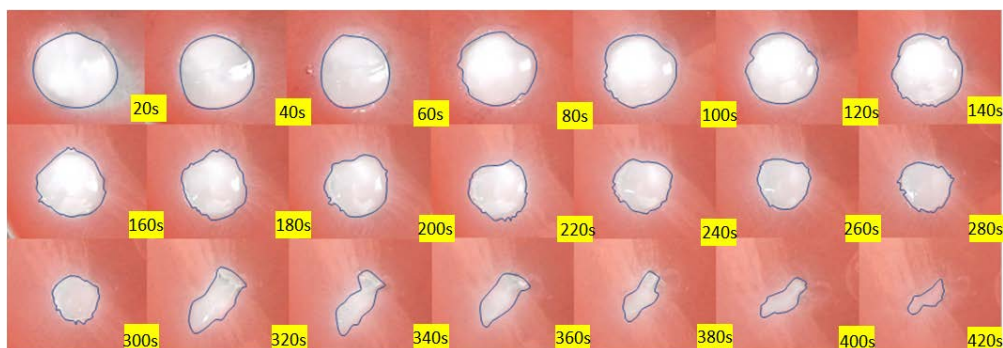


Figure 12. Photos of typical melting morphology of ice sphere under the gas flow rate of 1 L/min and with slag layer

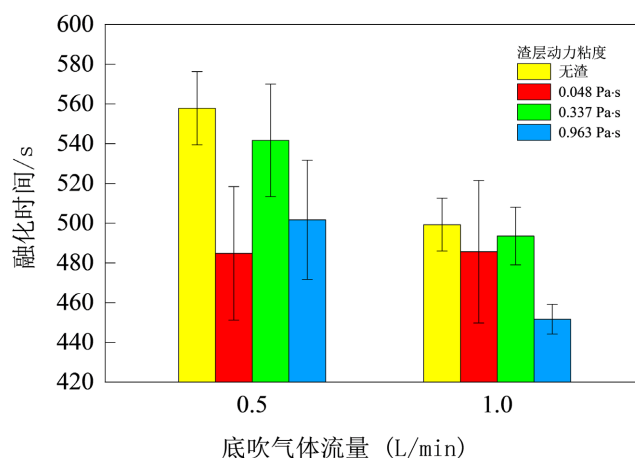
图 12. 在有渣层且气体流量为 1 L/min 条件下冰球的典型融化形貌变化照片

3.3. 冰球的融化时间

冰球融化时间实验结果如表 3 所示，如图 13 为冰球在不同条件下的融化时间对比图。在吹气流量为 0.5 L/min 时，渣层粘度为 0.048 pa·s 的情况下融化时间最短；在吹气流量为 1 L/min 时，渣层粘度为 0.963 pa·s 的情况下融化时间最短，且 0.048 pa·s 时也低于无渣层和 0.337 pa·s 的结果。在无渣层、渣层粘度为 0.337 pa·s 和 0.963 pa·s 条件下，随着吹气流量由 0.5 L/min 增加到 1 L/min，冰球融化时间减小；但在 0.048 pa·s 条件下，随着吹气流量的增大，冰球融化时间基本保持不变，这与冰球融化时，所处油 - 水界面的位置以及在界面运动中各个位置的停留时间有很大关系。结合实验现象分析，由于此渣黏度较小，从运动上看，1 L/min 的气体流量下冰球运动至远离吹气孔的地方，在较远位置处液面水平流的能量被渣层所消耗；而 0.5 L/min 流量下冰球运动的距离渣层处较近，反而易受流场的冲刷而使融化加快，因此从结果上看这两个流量下融化时间相差不大。

Table 3. Melting time of ice sphere under different conditions**表 3.** 冰球在不同条件下的融化时间

油层粘度/pa·s	流量/L/min	均值/s	标准差/s
无渣层	0.5	557.9	18.47
	1	499.3	13.35
0.048	0.5	482.7	31.19
	1	488.7	32.87
0.337	0.5	541.7	28.35
	1	493.5	14.54
0.963	0.5	501.7	30.02
	1	451.7	7.52

**Figure 13.** Comparison of melting time of ice sphere under different conditions**图 13.** 冰球在不同条件下的融化时间对比

4. 结论

本文以某厂 260 t 钢包原型根据相似比 1:8 制作而成的水模型, 模拟研究了渣层黏度、底吹气体流量大小对轻质废钢运动及熔化的影响。得出结论如下:

- 1) 冰球在无渣条件下其融化过程中形貌基本保持球状; 在渣条件下, 冰球在其不同介质中的融化快慢有差异, 导致其形貌呈不规则柱状, 并发生翻转;
- 2) 渣层黏度越大, 冰球在液面的运动受到渣层影响, 运动变慢;
- 3) 吹气流量越大, 渣眼面积越大, 且冰球的融化时间有所下降;
- 4) 渣层黏度对冰球的融化时间无明显影响规律, 但有渣层时融化时间低于无渣条件下; 在流量 1 L/min 条件下, 渣层黏度越大, 冰球的融化时间有减小的趋势。

基金项目

感谢山西省应用基础研究计划青年基金(201901D211013)、国家大学生创新创业计划项目(202110112052)、国家自然科学基金(51904204)、山西省大学生创新创业计划项目(20220118)、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] 中国废钢铁应用协会. 中国废钢铁[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2021: 28.
- [2] 中国废钢铁应用协会. 废钢铁产业“十四五”发展规划[J]. 资源再生, 2021(8): 16-21.
- [3] 王飞宇, 邓志勇, 苏艳翔. LF 精炼炉加废钢工艺研究[J]. 炼钢, 2020, 36(5): 27-31.
- [4] Penz, F.M. and Schenk, J.A. (2019) Review of Steel Scrap Melting in Molten Iron-Carbon Melts. *Steel Research International*, **90**, Article ID: 1900124. <https://doi.org/10.1002/srin.201900124>
- [5] Taniguchi, S., Ohmi, M., Ishiura, S., *et al.* (1983) A Cold Model Study on the Effect of Gas Injection upon the Melting Rate of a Solid Sphere in a Liquid Bath. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, **23**, 565-570. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.565>
- [6] Szekely, J., Grevet, H.H. and El-Kaddah, N. (1984) Melting Rates in Turbulent Recirculating Flow Systems. *International Journal of Heat Mass Transfer*, **27**, 1116-1121. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(84\)90129-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(84)90129-7)
- [7] Iguchi, M., Tani, J., Uemura, T., *et al.* (1989) Flow Phenomena and Heat Transfer around a Sphere Submerged in Water Jet and Bubbling Jet. *ISIJ International*, **29**, 658-665. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.29.658>
- [8] 刘越生, 高金平, 张建波, 等. 氧气复吹操作制度下废钢熔化特点的水模型实验研究[J]. 钢铁研究学报, 1990, 2(4): 1-7.
- [9] 刘越生, 高金平, 韩晔, 等. 水模型实验中用冰块模拟废钢熔化过程的理论解析计算[J]. 钢铁研究学报, 1992, 4(1): 15-21.
- [10] 成国光, 覃祖柱, 范涛. 电弧炉炉底吹气搅拌冷模拟研究[J]. 炼钢, 1994(3): 17-20.
- [11] Shukla, K., Dmiyry, R., Volkova, O., *et al.* (2011) Cold Model Investigations of Melting of Ice in a Gas-Stirred Vessel. *Metallurgical and Material Transactions B*, **42**, 224-235. <https://doi.org/10.1007/s11663-010-9442-9>
- [12] Cao, L., Liu, Q., Wang, Y., *et al.* (2018) An Attempt to Visualize the Scrap Behavior in the Converter for Steel Manufacturing Process Using Physical and Mathematical Methods. *Materials Transactions*, **59**, 1829-1836. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018125>
- [13] Xi, X., Yang, S., Li, J., *et al.* (2020) Physical Model Experiment and Theoretical Analysis of Scrap Melting Process in Electric arc Furnace Combined Blowing System. *Ironmaking & Steelmaking*, **47**, 748-756. <https://doi.org/10.1080/03019233.2019.1594549>
- [14] 杨荣旺, 陈超, 林尧铨, 等. 废钢在气体搅拌容器中运动融化的水模型实验[J]. 过程工程学报, 2022, 22(7): 954-962.
- [15] 裴康华, 陈超, 赵宇, 等. 废钢在底吹反应器中运动熔化及混匀的水模型实验[J/OL]. 过程工程学报: 1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4541.tq.20220412.1625.006.html>, 2022-08-08.
- [16] Wu, L., Valentin, P. and Sichen, D. (2010) Study of Open Eye Formation in an Argon Stirred Ladle. *Steel Research International*, **81**, 508-515. <https://doi.org/10.1002/srin.201000063>