

# 铁水喷吹CO<sub>2</sub>涌动扒渣的渣金行为研究

董家成<sup>1</sup> 皮柔<sup>2</sup> 高洋<sup>1</sup> 肖卿鹤<sup>1\*</sup> 盖晟浩<sup>1</sup>

1. 辽宁科技大学应用技术学院 辽宁鞍山 114051

2. 贵州航天新力科技有限公司 贵州遵义 563000

**摘要:** 随着对高品质钢的需求不断增长人们开发了多种用于铁水和钢水精炼的工艺, 如脱硫、脱碳、去除夹杂物、缩小化学成分范围、热均匀化和生产低杂质含量的钢等其中铁水脱硫工艺是提高钢材质量的重要手段。铁水预处理后, 在铁水罐内有大量的脱硫渣, 为了避免回硫防止铁水流失要通过一些手段将这些渣子除去。脱硫与扒渣是两个相互独立、且又紧密联系的铁水预处理工艺, 脱硫工艺决定了处理终点铁水含硫的水平, 而扒渣则是将脱硫处理后的高硫渣从铁水中去除的重要手段, 是决定入炉硫总量的主要因素刮板扒渣机作业过程中由于刮板无法以倾斜状态到达铁水包壁, 铁水包壁附近的炉渣在无外力作用下难以自动上浮至刮板行程范围内, 残留在炉中的炉渣会出现回硫现象从而影响钢水质量长期积累的残留炉渣可能会对炉底和冶炼设备造成腐蚀和磨损降低设备使用寿命并增加设备维护和更换成本。所以为了提高铁水的纯度。

**关键词:** 脱硫工艺; 铁水; 扒渣; 炉渣

## 引言

迄今为止大量学者通过水模型实验或者热态实验的方法对铁水罐扒渣工艺进行了优化, 取得了丰富的成果<sup>[10-13]</sup>。刘晓卿等人提出了在铁水罐上安装透气转采用吹气辅助扒渣工艺, 并且优化了透气转安装位置, 把扒渣时间减少到了7 min以内, 铁损降低至平均每吨铁铁损3.5 kg以内, 平均出钢回硫质量分数降至0.002%以内之后杜秀峰等人和仇东丽等人对铁水罐侧吹辅助扒渣进行水模实验研究, 确定了透气砖合理的安装位置和侧吹气体流量, 提高和改善了颗粒镁脱硫后的扒渣效率许飞等人建立几何相似比1:4水模型, 用物理模拟方法研究了铁水罐侧吹辅助扒渣对驱渣面积的影响<sup>[17]</sup>。虞大俊开发

了喷枪吹气辅助扒渣工艺, 提出了吹气赶渣原理, 确定了关键工艺参数, 将扒渣时间降至8 min, 转炉回硫量降至0.012%丁金发等人有针对性地对喷枪顶吹系统进行了改造, 并对喷吹工艺进行了优化, 使得喷枪寿命由最初30次提高到了62次, 扒渣时间缩短了2 min万雪峰等人和文湘霖等人通过从喷枪结构、喷头直径、喷口数量和喷口布置方式等角度对顶吹喷枪结构优化, 提高了扒渣效率, 并使用铁水罐来进行工业实验, 提高了出钢率俞文燕对涌动式扒渣技术进行了综合系统的探讨, 归纳了该装置的结构特征和优势, 指出其能够有效、高品质地生产成本较低的高质量钢材以上均为手动控制扒渣, 每位操作工依据个人经验来判断扒渣的终点, 导致扒渣净度标准存在差异, 这进一步增加了低硫钢钢水硫含量的控制难度2019年起某钢厂在KR脱硫自动扒渣系统改进中引入了基于深度学习的图像识别技术用以取代人眼观察和手动扒渣的操作方式这一创新实现了全自动扒渣控制模式显著降低了操作工的劳动强度。

## 作者信息:

董家成, 男(2002.02-), 蒙古族, 辽宁朝阳人, 本科在读, 研究方向: 汽车服务工程;

皮柔, 男(1997.11-), 汉族, 贵州铜仁人, 硕士, 副主管工艺师, 研究方向: 热处理;

高洋, 男(1981.09-), 汉族, 辽宁铁岭人, 硕士, 副教授, 研究方向: 机械工程;

肖卿鹤(通讯作者), 男(1989.10-), 汉族, 江西赣州人, 硕士, 讲师, 研究方向: 机械工程;

盖晟浩, 男(2000.12-), 汉族, 辽宁朝阳人, 本科在读, 研究方向: 汽车服务工程。

## 一、铁水飞溅研究现状

### 1. 减少飞溅的研究方法

为了研究和控制铁水飞溅现象, 学者们常采用水模型实验和数值模拟的方法。工业实验虽然可以直观得到结果输出但对熔池内部的具体情况无法了解, 且耗时和

需要庞大的资金支持水模型实验通过相似原理，可以与现实的炼钢相对照，能直观观察内部情况，但由于铁水内部的情况错综复杂，无法完全对照炼钢过程中飞溅现象会直接影响炼钢效率。通过水模型实验，探究顶吹氧气炼钢的飞溅过程中各容器收集到的液滴量对横向和垂直位置喷溅的液滴都进行了研究，得出结论为：各容器间喷溅到的液滴量差异较大，最接近模型的容器比其他的容器喷溅到更多的液滴，且距离模型最远的容器收集到的液滴量最少。目前，冶金工业中大多数工艺都具有多个流体相，为了控制这些复杂的工艺，从而来提高对这些工艺进行研究的能力，使用数值模拟最优方案。通过流体体积对多种流体界面进行追踪模拟：模拟了浸入式喷枪在水模型和铁水模型中飞溅的过程的发生，即从顶部淹没气泡，避免液滴分解，以形成飞溅。同时主要模拟了气泡在水模型和铁水模型中的上升，大于三毫米的气泡在上升时的速度随瞬时形状的变化而变化，大于十二毫米的气泡在铁水中上升时可以保持稳定，但却易破裂在水中，在水中的易破裂现象可进行具体研究。铁水中，气泡的变化和喷口的位置对铁水流动和喷溅行为产生重要影响。为进一步分析，采用VOF法模拟侧吹气泡在铁水模型中的流动和喷溅行为发现：气泡离开喷口后，在液体中上升、直至破裂，形成一部分泡沫碎渣，会导致铁水产生波动；氧气顶吹转炉炼钢过程中有铁水喷溅行为，不同喷口间距引起的喷溅的行为有所不同，喷口距离的增大会导致更大的喷溅，故在实际应用中，可以适当缩短喷口间距，从而减少喷溅。采用水模型和铁水模型模拟研究了复合吹炼过程中的飞溅和喷溅，研究不同的喷枪位置和喷枪口数量，以此来抑制喷溅的产生。

## 二、研究内容与方法

模型用于捕获热金属铁水包中炉渣、熔融铁水和氮气之间的界面，用离散相模型（DPM）追踪氮气气泡轨迹，利用大涡模拟（LES）模型求解多相流系统中气泡-液体相互作用引起的复杂湍流。主要目的是探索涌动式扒渣过程中扒渣行为，主要研究内容如下涌动式扒渣的铁水飞溅模型构建建立涌动式扒渣的物理模型，经过模型简化和假设后，利用数值模拟求解其数学模型，包括质量守恒方程、动量守恒方程、LES模型、离散相颗粒模型、喷吹量随温度变化模型等，阐述边界条件和数值模拟细节，验证模型的准确性分析铁水飞溅的原因。喷枪位置和喷吹量的参数优化描述铁水包内流场流动特征。从三个角度分别对喷枪位置和喷吹量进行参数优化，即铁水

飞溅角度、液面波动角度、卷渣角度。其中铁水飞溅角度具体表现为飞溅次数和飞溅量的角度优化操作参数。铁水飞溅行为研究从宏观角度阐述飞溅液滴和飞溅片的产生过程以及二次飞溅行为，定量分析铁水飞溅耗能以及飞溅率，描述铁水在轴向高度上的分布情况。铁水包后壁耐火材料侵蚀研究探究喷枪位置和喷吹量对铁水包后壁耐火材料侵蚀的影响，定性描述铁水包内涡流分布。

### 1. 水模试验

涌动式扒渣是一种高温且难以直接观察的冶金过程，其现象复杂多样。由于直接实验法只适用于特定条件下的现象，无法揭示其本质规律，因此越来越多的学者转向采用基于相似原理的模型研究方法。这种方法基于方程或量纲分析，导出相似准则数，并通过模型实验得出这些数之间的关系，然后将这些关系推广到实际物理系统，以揭示现象或过程的规律性。此外，本章还运用水模型研究了气泡在铁水包内的上升行为、渣眼的形状和尺寸变化，以及液相的飞溅和卷渣行为。

### 2. 实验室装置

本实验平台由喷吹槽主体、供气系统、数据采集系统三部分组成。为水模型实验示意图，圆柱形有机玻璃容器内装水，水面上铺设一层90号机油代替顶渣，一个L型喷管贴壁放置，以减少喷枪表面对气泡上升的影响。氮气从钢瓶中流出，通过缓冲罐和流量计后从喷管侧吹进水中。在气泡上升过程中开启高速摄像机，观察气泡上升过程中的形状、气泡尺寸、气泡带动液滴和油滴向上飞溅、和油滴被卷入水槽的行为。通过改变喷嘴到罐底的距离C和喷嘴到侧壁的距离F，观察气泡对液位和液滴飞溅的影响。为实验原理图。

### 3. 水模型的液滴飞溅

使用高速摄像机捕捉气泡行为后的图片经过后处理软件处理后，发现就飞溅高度而言，液滴的飞溅在垂直平面方向呈现三种方向：在涌动液面凸起的上方、凸起液面的左侧和右侧。飞溅方向不同导致飞溅距液面的垂直距离不同。在喷吹量为 $0.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 时，向左侧和向右侧飞溅的高度仅比同时刻波动的液面高1.6 cm，并水平位移的距离也仅在液面波动的范围内；而向上侧飞溅的液滴是同时刻液面波动的5.9 cm，尽管没有水平位移，但向上方向飞溅液滴造成的危险远超其他飞溅方向。

### 4. 渣层厚度对赶渣效果的影响

在涌动扒渣的数值模拟中，由于在实际工业生产中每次扒渣的渣层厚度不固定，所以必须考虑不同渣层厚

度下的赶渣情况。维持喷枪进入深度为1000 mm、插入部位为0.4P处以及喷吹气体流量为300 m<sup>3</sup>/h不变，依次变化渣层厚度为60、80、100 mm，讨论不同渣层厚度时对赶渣效果的影响。为同一条件下吹开状态稳定后不同渣层厚度时的液面裸露情况。深度为1000 mm、插入位置为0.4P处以及喷吹气体流量为300 m<sup>3</sup>/h的相同条件下，渣层越厚，无渣层区域面积越小，当渣层厚度为60 mm时，渣层吹开的面积最大。

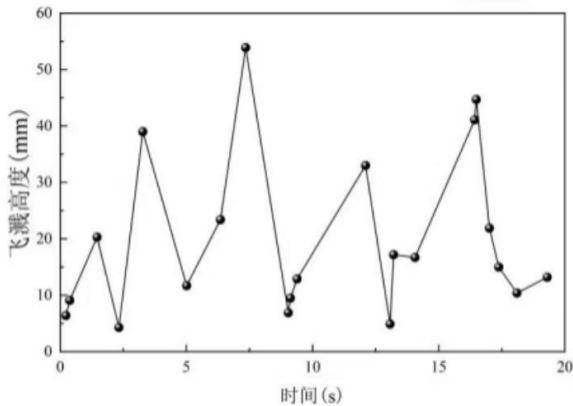


图1 水模型实验飞溅高度

### 5. 从飞溅量角度优化参数

不同喷枪位置和喷吹量下铁水飞溅量的变化情况。从图1中可以看出喷吹量对铁水飞溅的影响要高于喷枪位置，这是因为喷吹量直接影响了铁水表面的涌动和动力学特性，虽然喷枪位置可以影响到铁水的流动情况和喷射方向，但在整个涌动式扒渣系统中，喷吹量是直接控制涌动强度和铁水表面状态的关键因素。可以看出喷枪位置越靠近铁水包后壁，铁水飞溅量越小。L=1.3 m的铁水飞溅量明显小于其他两个喷枪位置，而L=1.5 m和L=1.7 m的铁水飞溅量相差不大，飞溅量稳定在120 kg左右。从图1可以看出随着喷吹量Q的增加飞溅量显著增加。当喷枪位置L=1.5 m，喷吹量Q=160 m<sup>3</sup>/h时，最大

铁水飞溅量可达243 kg，分别比Q=115 m<sup>3</sup>/h和Q=65 m<sup>3</sup>/h时增加86 kg和146 kg。铁水飞溅量越大，越不利于人身安全和生产作业，所以从铁水飞溅量的角度，喷吹量Q=115 m<sup>3</sup>/h时既实现了较少的飞溅次数，又降低了铁水飞溅量是良好的操作条件。对于喷枪位置来说，喷枪位置L=1.5 m和L=1.7 m两者相差不大。得知L=1.7 m的飞溅次数要多于L=1.5 m，这说明在铁水飞溅量相差不大的情况下，L=1.7 m的飞溅液滴尺寸要小于L=1.5 m的液滴尺寸，而液滴尺寸越小，对工人人身伤害越大。渣层面波动可以作为一种指示器，反映涌动式扒渣过程中操作状态的变化。

### 参考文献

- [1] 马琳, 王博, 等. 高效低铁损扒渣技术现状及发展[J]. 莱钢科技, 2012, (1): 16-18
- [2] 白小伟, 吴胜才. 铁水扒渣设备综述[J]. 冶金设备, 2013, (4): 48-5
- [3] 郭怀华. 铁水脱硫扒渣是包钢发展的重要环节[J]. 包钢科技, 2002
- [4] 付春才, 李彦杰. 转炉冶炼过程回硫分析与控制[J]. 冶金管理, 2019, (5)
- [5] 黄远涛. LF精炼钢包底吹氩工艺数学物理模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学2011
- [6] 邵品. 冶金熔体内气泡行为的数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015
- [7] 杜秀峰, 赵继宇. 铁水罐镁脱硫辅助除渣综合技术开发[J]. 武钢技术, 2008, (1): 19-24.
- [8] 李明晖. 铁水扒渣顶枪结构优化及耐火材料研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019
- [9] 王楠. 浸入式喷粉铁水脱硫过程的模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2000