· XXXX ·

底吹氩钢包中气泡捕获夹杂物的数值模拟

李知旂，郝志博，李尚平，骆合力
（北京钢研高纳科技股份有限公司，北京 100081）

摘　要：钢包底吹氩精炼是去除钢中非金属夹杂物、改善钢材洁净度的关键手段。然而在实际生产中发现，夹杂物的去除存在明显的“尺寸选择性”：大于150 μm的夹杂物基本能被有效去除，而小于50 μm的微细颗粒却总有一部分残留。为了探究该现象，利用VOF-DPM耦合方法搭建了底吹氩钢包的三维模型，并加入了粒径分组差异化捕获概率模型。通过借鉴气泡-颗粒相互作用理论，推导出了有效黏附因子与粒径之间的标度律，并将其写入UDF嵌入Fluent，从而实现了对50~300 μm六组粒径颗粒的差异化捕获判定。模拟结果显示，气泡捕获和表面滞留共同决定了去除效率，但两者的主导地位随粒径改变较大。对50 μm小颗粒而言，模拟结束时气泡捕获率为39.0%，液面捕获率为44.02%；若将时间外推至2 h，综合去除率可达72.93%。对于≥200 μm的大颗粒，主要依靠上浮后的表面滞留去除（占比超60%），综合去除率在150~200 μm趋于稳定，200 μm时可达82.1%。此外，无法在液面稳定停留是微细颗粒难以去除的主因：50 μm颗粒在液面的平均停留时间仅49.3 s，而≥150 μm颗粒则超过578 s。实验结果清晰揭示了捕获机制随粒径的转换规律，对底吹氩工艺的精细化调整具有实际参考价值。

关键词：底吹氩；钢包；夹杂物去除；流体体积法-离散相模型耦合方法；粒径分组捕获
DOI:10.20057/j.1003-8620.N260111　　**中图分类号：**TF769

Numerical Simulation of Inclusion Capture by Argon Bubbles in Bottom-Blowing Ladle

Li Zhiqi, Hao Zhibo, Li Shangping, Luo Heli
(Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: Ladle bottom-blowing argon refining is essential for removing non-metallic inclusions from molten steel and improving steel cleanliness. However, in actual production, a size-selective issue still exists: inclusions larger than 150 μm can be removed quite effectively, while a portion of fine particles smaller than 50 μm always remains. To investigate this problem, 3D ladle model was built using the VOF-DPM coupled method and a size-grouped capture probability model was implemented. By referring to bubble-particle interaction theory, a scaling law that links the effective attachment factor to particle size was derived and incorporated into Fluent via UDFs. This allowed the capture behavior of six particle groups (50 μm to 300 μm) to be judged differently. The simulation shows that both bubble capture and surface retention control the removal efficiency, but their dominance varies significantly with particle size. For 50 μm particles, the bubble capture rate is 39.0% by theend of the simulation, and the surface capture rate is 44.02%; if the time is extrapolated to 2 h, the overall removal rate would reach 72.93%. For particles ≥200 μm, the removal is mainly attributed to surface retention after flotation, which accounts for over 60% of the removal, and the overall removal rate levels off within the 150 μm-200 μm size range, reaching 82.1% at 200 μm. It was also found that the inability to remain stably at the surface is the main reason why fine particles are difficult to remove: 50 μm particles can only stay at the surface for about 49.3 s on average, while particles ≥150 μm can remain for over 578 s. These results clearly reveal the transition of capture mechanisms with particle size, and they are considered to be of practical reference value for the precise adjustment of the bottom-blowing argon refining process.

Key Words: Bottom-blowing Argon; Ladle; Inclusion Removal; VOF-DPM Coupled Method; Particle Size-grouped Capture

钢包底吹氩精炼是去除钢中非金属夹杂物、提升钢液洁净度的核心技术。以Al_2O_3、$MgO·Al_2O_3$为主的夹杂物会显著影响钢液流动性和最终产品质量[1-4]。工业实践表明[5]，底吹氩对>150 μm大颗粒去除效果显著，但对<50 μm微细颗粒的综合去除率较低，其粒径选择性去除机理尚不清晰。

气泡捕获夹杂物在物理上可分为碰撞、黏附及脱附[6-8]，其总捕获概率受粒径影响强烈。随着计算

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFC3902002）
作者简介：李知旂（1999—），男，硕士，工程师；　**E-mail:**hjlzq12345@163.com；　**收稿日期：**2026-07-23
Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

流体力学的发展，大量学者针对钢包底吹氩工艺开展了数值模拟研究。Mazumdar等[9]和Sheng等[10]系统建立了气搅拌钢包内流动与微夹杂物生长的物理与数学模型，为后续模拟提供了理论基础。在此基础上，Liu等[11]基于36个工况的数值模拟，明确了夹杂物粒径越大、吹氩时间越长去除率越高的基本规律。张利超等[12]建立了底吹氩钢包内废钢熔化的三维模型，探究了气液两相流动与传热行为；王宁等[13]针对LF精炼过程，提出了双喷嘴差流吹氩方式，优化了通电升温阶段底吹氩参数；杨凤国等[14]和杨亚迪等[15]分别研究了不同底吹氩模式下钢包内的流场特征与三相界面行为，指出增大吹氩量虽能有效缩短混匀时间并促进夹杂物去除，但同时也增加了液面卷渣的风险；黄凯[16]系统优化了60 t钢包底吹氩时的透气砖位置与流量参数。

从已有工作来看，底吹氩工艺的数值模拟大多聚焦于宏观操作参数（如吹氩量、透气砖布局、差流模式）的优化与“混匀-卷渣”的工艺平衡，而气泡捕获夹杂物过程中的“粒径选择性”这一微观去除机理却少有涉及。Liu等[11]虽捕捉到了大颗粒更易去除的趋势，但对产生该现象的物理根源——即气泡捕获（碰撞、黏附、脱附）与表面滞留机制随粒径的转换规律——缺乏深入的机理性揭示。此外，现行模拟在处理气泡对夹杂物的捕获概率时，大多采用“碰撞即捕获”的简化假设或恒概率模型[17-18]，这与真实物理过程相悖，无法准确描述不同尺寸夹杂物的去除特征。近期少数研究尝试借助几何距离法解决粒径依赖问题[11]，但因需在每步中反复计算颗粒与气泡界面的距离，导致运算负荷极大，难以满足工业尺度下长时程模拟的需要[9-10]。

实验构建了粒径分组差异化捕获模型：参照气泡-颗粒相互作用理论[19-20]，推导有效黏附因子与粒径间的标度律，经UDF嵌入Fluent中，用于判别50~300 μm六组典型粒径颗粒的捕获情况。该模型摒弃了传统“碰撞即捕获”的简化假设，能够真实反映不同粒径颗粒在碰撞后黏附与脱附的竞争机制，从而在统计意义上更准确地表征气泡捕获过程的粒径依赖性特征；同时，整合气泡捕获与表面滞留两条途径，系统分析机制随粒径的转变规律，为底吹氩工艺优化提供理论依据。

本研究所采用的基础流体力学与湍流控制方程参考了文献[9-10]中的标准推导模型，此处仅列出必要关键方程，详细数学推导可参见引用文献。为保证计算精度与收敛性，模型的边界条件与离散方法均经过严格的参数独立性验证，具体过程见1.3节。

1　实验

1.1　数学模型

气液两相流动采用VOF方法模拟，通过求解气相体积分数的输运方程追踪氩气与钢液的界面。混合物的密度和黏度按两相体积分数加权平均计算。表面张力采用连续表面力（CSF）模型表征。湍流模拟采用Realizable k-ε模型，该模型能够合理预测钢包内强湍流剪切流动的特征。

夹杂物颗粒采用拉格朗日方法追踪，其运动由曳力和重力等主导作用控制，其他作用力（如虚拟质量力、Basset力、Saffman升力等）因量级较小而忽略。曳力系数采用Clift和Gauvin提出的球形颗粒经验关联式计算。

气泡捕获夹杂物涉及碰撞、黏附、脱附及破渣四个环节。1）碰撞阶段：颗粒与气泡在湍流钢液中相遇；2）黏附阶段：两者接触后液膜逐渐排空直至破裂，继而发生黏附；3）脱附阶段：已黏附颗粒可能受气泡表面剪切而脱落；4）破渣阶段：气泡将颗粒携至液面，进而穿过渣层并稳定停留。总捕获概率等于各阶段概率的乘积，如式（1）。

$$P_{\text{capture}} = P_c \times P_a \times \left(1 - P_d\right) \tag{1}$$

式中，P_c为碰撞概率（无量纲）；P_a为黏附概率（无量纲）；P_d为脱附概率（无量纲）。根据气泡-颗粒相互作用理论，液膜排空所需时间t_f与颗粒粒径的三次方成正比，而颗粒与气泡的接触时间t_c则与粒径的三分之二次方成正比。由于黏附概率P_a随液膜排空时间的延长而降低，其粒径依赖指数可近似取0.6（即2/3）；同时，气泡表面剪切力导致的脱附概率P_d随粒径增大而增强，其量级与d_p^2成正比。将黏附与脱附的拮抗效应合并，有效黏附因子可写成如下指数衰减形式。此外，参考Ralston等关于液膜排空过程标度律的研究，式（2）中的系数$\alpha = \beta' = 0.8$参照有效附着系数取值：

$$\begin{aligned} P_{\text{attach}}\left(d_p\right) &= P_a\left(d_p\right) \times \left[1 - P_d\left(d_p\right)\right] \\ &= \exp\left[-\alpha\left(\frac{d_p}{d_{\text{ref}}}\right)^{0.6} - \beta'\left(\frac{d_p}{d_{\text{ref}}}\right)^2\right] \end{aligned} \tag{2}$$

式中，$P_{attach}\left(d_p\right)$为有效黏附因子（无量纲）；$P_a\left(d_p\right)$为黏附概率（无量纲）；$P_d\left(d_p\right)$为脱附概率（无量纲）；$d_p$

为颗粒直径,μm;d_{ref}为参考粒径,取150 μm;α与β'均为无量纲调节系数,取值为0.8。该式右侧指数项中,第一项表征黏附概率随粒径增大而衰减的效应,第二项表征脱附概率随粒径增大而增强的效应,二者叠加使得有效黏附因子随粒径增大而加速趋近于零。

基于上述物理内涵与极限行为分析,图1通过离散数值清晰地展示了有效黏附因子随粒径增大的衰减规律,在50 μm处P_{attach} = 0.605,在300 μm处P_{attach} = 0.012,物理趋势明确。系数选取遵循"宏观约束下的微观反推"原则,使模型遵循工业统计中">150 μm颗粒基本去除、<50 μm颗粒部分残留"的粒径选择性去除特征。

图2(a)(b)(c)(d)分别直观展示了气泡捕获颗粒的碰撞、黏附、脱附与破渣机制,它们共同组成了气泡-颗粒作用的全过程。这几类物理行为在钢包内相伴发生且相互制衡,最终决定着各粒径颗粒所能抵达的去除路径。

1.2 数值模拟设置

本研究以实际投产的2 t级真空连铸装备为原型,底吹喷口采用偏心布置方案以增强钢包内循环流动。钢包直径630 mm,总高700 mm,下部680 mm为钢液区,喷口偏心距157 mm。计算域采用四面体网格离散,网格尺寸20 mm,共110 009个单元。最小正交质量0.21,最大长宽比14.5,均处于可接受范围。模型中钢液密度、黏度等物性参数均来源于FGH4097合金在精炼温度下的现场实测数据。氩气按理想气体处理,Al_2O_3颗粒密度3 980 kg/m^3。设氩气入口为速度入口(0.32 m/s,对应25 L/min),顶部为压力出口,壁面为无滑移绝热边界。时间步长定为0.002 s,模拟总时长为1 200 s。在钢液区内共注入6 000个颗粒,按50、100、150、200、250、300 μm分为6组,每组1 000个,初速度为零,并在第一个时间步一次性全部释放。钢包几何模型、网格划分及气液分布如图3所示。

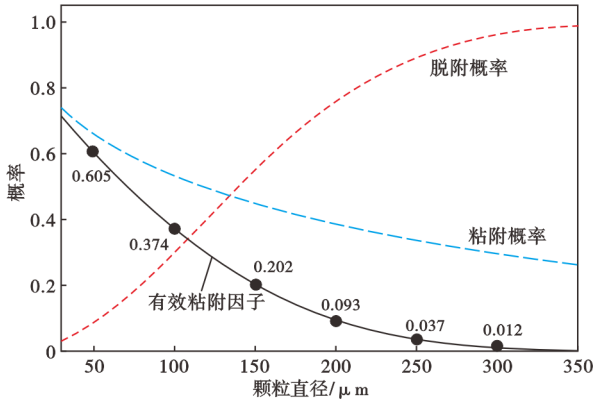


图1 有效黏附因子随粒径变化

Fig. 1 Effective attachment factor versus particle diameter

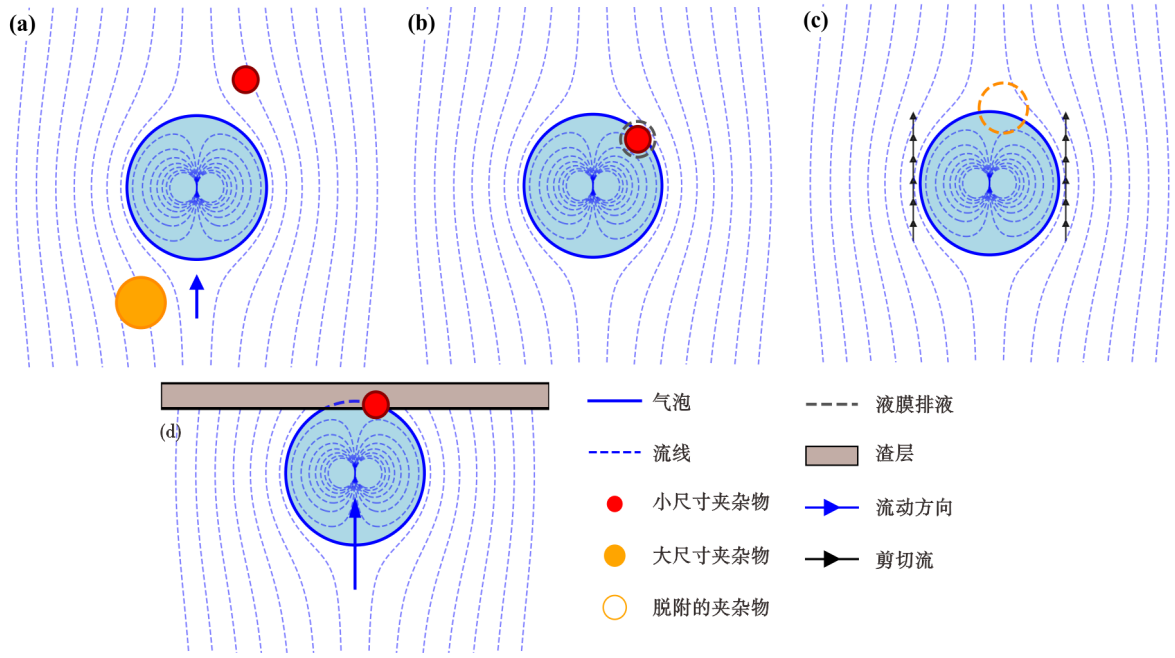


图2 气泡捕获颗粒的四种典型情形示意图:(a)碰撞阶段,(b)黏附阶段,(c)脱附阶段,(d)破渣阶段

Fig. 2 Schematic diagram of four typical scenarios of bubble-particle capture: (a) collision stage, (b) attachment stage, (c) detachment stage, (d) slag rupture stage

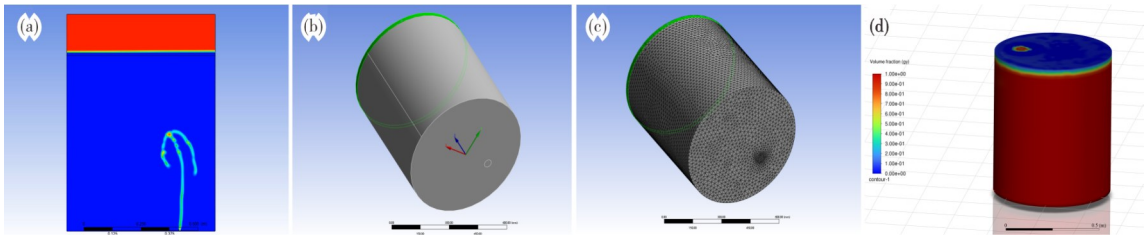


图3　钢包几何模型、网格划分及气液分布示意：(a) 钢包截面，(b) 三维几何模型，(c) 四面体网格，(d) 三维气液分布云图（钢包直径630 mm，高700 mm；喷口偏心距157 mm，直径40 mm；钢液高度680 mm；红色为钢液，蓝色为氩气）

Fig. 3　Schematic of ladle geometry, mesh generation and gas-liquid distribution: (a) cross-section, (b) 3D geometric model, (c) tetrahedral mesh, (d) 3D gas-liquid distribution contour (ladle: dia. 630 mm × height 700 mm; nozzle offset: 157 mm, dia. 40 mm; molten steel height: 680 mm; red: molten steel, blue: argon)

气泡捕获由UDF实时判定：当颗粒进入喷口上方的氩气羽流区且当地氩气体积分数大于0.001时，按式(2)计算有效黏附因子并以该概率随机判定是否捕获。为全面表征颗粒在液面附近的驻留行为，本研究采用了差异化统计阈值：以颗粒在Z≥0.60 m处连续停留≥5 s作为表面滞留的基本判定标准；以更贴近真实液面(Z=0.68 m)的Z≥0.65 m处连续停留≥5 s作为精细判定标准。表面滞留由后处理Python脚本独立分析。

1.3　数值参数独立性验证

为确保数值结果的可靠性，本研究对网格尺寸和时间步长进行了独立性验证。验证模拟统一采用60 s独立算例，以该时段内的颗粒表面捕获率作为评价指标。采用粗(25 mm，约7.0×10^4单元)、基准(20 mm，约1.1×10^5单元)、细(16 mm，约1.8×10^5单元)三套四面体网格进行验证。三套网格的质量指标均满足计算要求：最小正交质量分别为0.203、0.210、0.230，最大长宽比分别为16.5、14.5、16.0。以20 mm基准网格的60 s表面滞留捕获率(44.0%)为基准，细网格(16 mm)与基准网格的偏差为2.4%，粗网格(25 mm)的偏差为2.5%，均稳定控制在3%以内，且三套网格下颗粒的捕获机制特征保持一致。综合考虑计算精度与计算效率，本研究最终选用20 mm网格作为计算域离散方案。

时间步长独立性：在20 mm网格的基础上，进一步对比了0.001、0.002、0.004 s三种时间步长。0.002、0.001 s时间步长的60 s表面滞留捕获率偏差仅为0.7%，0.002、0.004 s的偏差为1.0%。综合考虑计算精度与计算效率，本研究选用0.002 s作为计算时间步长。

2　结果与讨论

2.1　粒径分组差异化捕获模型的建立

2.1.1　有效黏附因子的标度律推导

如1.1节所述，气泡对夹杂物的捕获概率由碰撞、黏附及脱附三环节共同决定。碰撞环节已在2.1.2节所述的“空间概率场”判定策略中予以考虑，因此UDF需要嵌入的核心是有效黏附因子P_{attach}，也就是颗粒发生碰撞后能成功黏附且不发生脱附的概率。

根据气泡-颗粒相互作用理论[8-9]，液膜排空时间与粒径的三次方成正比($t_f \propto d_p^3$)，而接触时间与粒径的三分之二次方成正比($t_c \propto d_p^{2/3}$)，所以黏附概率P_a随粒径增大而单调递减。同时，毛细黏附力$F_{cap} \propto d_p$，气泡表面剪切力$F_{shear} \propto d_p^2$，因此脱附概率P_d随粒径增大而单调递增。将两者合并，有效黏附因子可写成式(2)所示的指数衰减形式，其中第一项表征黏附概率的衰减，第二项表征脱附概率的增强。

2.1.2　气泡捕获与表面滞留判据

气泡捕获的判定由UDF实时执行。由于钢包内气泡群是弥散分布的，且夹杂物颗粒尺寸远小于单个氩气泡，本研究用基于局部“碰撞概率场”的工程化方案来代替传统的轨迹求交法。先用VOF模型算出钢包内的局部气相体积分数α，在密集的氩气羽流区，α值越高，说明该空间区域内气泡界面越密集，颗粒在该网格内发生物理碰撞的概率也就越高。为了让“碰撞概率场”只在真实羽流泡状流核心区起作用，UDF的判定区域被严格限定在喷口上方直径40 mm、高680 mm的圆柱形羽流区内，并设定触发碰撞的空间阈值$\alpha > 0.001$。

当颗粒满足上述空间概率场触发条件后，系统会调用基于气泡-颗粒相互作用理论推导的式(2)计

算有效黏附因子 P_{attach},再通过随机概率最终判定该颗粒能否被成功捕获。这种用局域气含率构建接触概率场、用概率模型确定最终捕获的策略,本质上是在工业大尺度长时程模拟中,对传统求解单一气泡与颗粒动力学轨迹碰撞方法的一种合理降维和统计近似,能在保证计算可行性的前提下,有效捕捉宏观尺度的捕获趋势[10]。

表面滞留的判定则由后处理Python脚本独立完成:如果某个颗粒在液面附近(Z≥0.65 m)的连续停留时间达到或超过5 s,就认定它已被表面稳定滞留。把这两种机制分开处理,能有效避免耦合干扰,方便后续对比气泡捕获与表面滞留两条去除路径的相对贡献。

2.2 气泡羽流形态与颗粒分布演化

2.2.1 氩气羽流形态分析

图4展示了氩气体积分数在三维空间中的分布形态。氩气从偏心喷口注入后,在钢液中形成了一条边界清晰、连续且稳定的高气含率羽流柱,中心区氩气体积分数约0.15,并随高度提升向四周略有扩散。从速度矢量图可以看出,钢液被上升气泡群携带向上运动,到液面后转向两侧沿壁面回落,形成不对称的大尺度循环流动。这种循环的本质是羽流区内气泡上升产生的浮力驱动,进而引起钢液的宏观对流。大尺度循环不仅强化了钢液混合,还有利于把钢包壁面及底部的夹杂物向羽流区输运。从物理空间上看,气泡羽流柱内的高气含率区域是连续贯通的,这种连续性让羽流区成为气泡捕获夹杂物的核心作用区,为提高捕获概率创造了有利条件。

2.2.2 颗粒空间分布的时序演化

图5展示了不同时刻颗粒在钢液中的空间分布演化过程。初始时刻(t=0 s),6000个颗粒在钢液内均匀分布。随着底吹氩进行,不同粒径颗粒的运动行为有显著差别:大尺寸颗粒(红色)因浮力较大,短时间内快速上浮到液面,并受偏心喷口形成的不对称大尺度循环流驱动,大量聚集在喷口对侧方向的液面区域(t=40 s),随后被表面滞留机制捕获或随渣层排出;小尺寸颗粒(蓝色)受湍流循环流裹挟更强烈,即使到液面也难以稳定停留,随后被湍流卷回钢液。随着时间推移(100 ~500 s),大颗粒逐渐被清除,中等粒径颗粒开始上浮,最终钢液内只剩下少量悬浮的微细颗粒,这些微细颗粒主要分布在羽流区之外的钢液循环通道中。这个演化过程直观反映出大颗粒浮力主导上浮快、小颗粒湍流裹挟滞留久的机制,也说明上浮颗粒倾向于在喷口对侧液面聚集,为后面定量分析粒径选择性去除规律提供了基础。

2.3 捕获过程的粒径依赖性规律

2.3.1 不同粒径颗粒的上浮与停留行为

图6(a)直观呈现了各粒径颗粒平均Z高度随时间的演化轨迹。对于200 μm及以上的大颗粒,其平均高度在模拟初期(约100 s内)即迅速爬升至液面附近(Z≈0.66 m)并保持平稳,浮力在该粒径区间占据绝对优势,颗粒能够有效自主上浮。相反,50 μm小颗粒的平均高度始终徘徊在Z≈0.38 m左右,这是典型的大尺度循环流悬浮特征,难以触及液面。值得注意的是,处于临界尺寸的100 、150 μm颗粒,其平均高度整体虽上升,但600 s后曲线出现明显锯齿

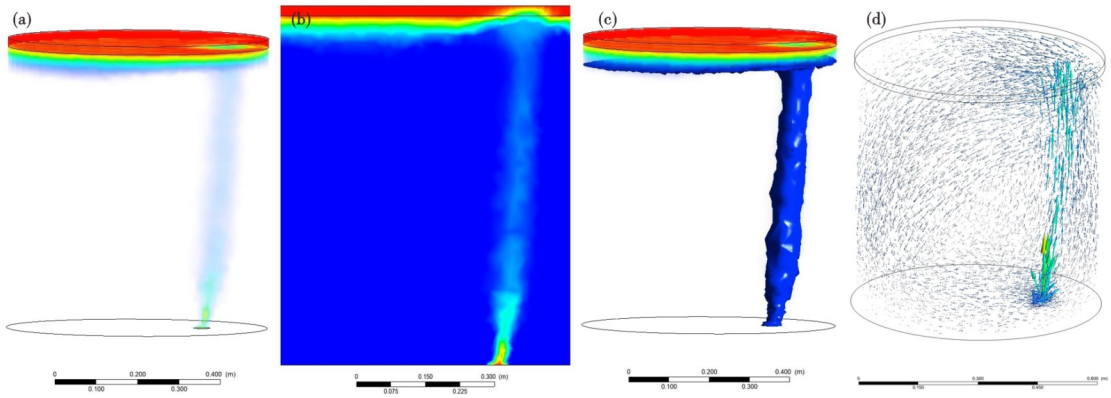


图4 氩气羽流形态与钢液流动特征:(a) 三维体积渲染云图,(b) 纵截面氩气体积分数云图,(c) 氩气体积分数等值面(α_Ar = 0.05),(d) 纵截面速度矢量场(箭头表示流速方向和相对大小)

Fig. 4 Argon plume morphology and molten steel flow: (a) 3D volume rendering contour, (b) vertical cross-section contour of argon volume fraction, (c) isosurface of argon volume fraction (α_Ar = 0.05), (d) vertical cross-section velocity vector field (arrows indicate the flow direction and relative magnitude of molten steel velocity)

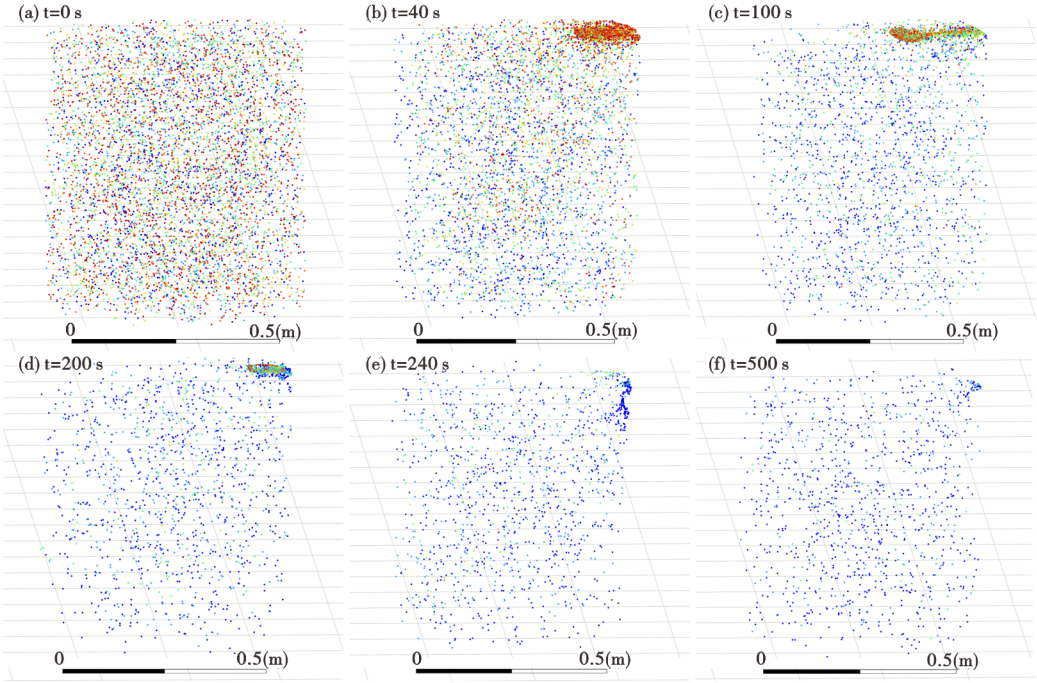


图5　不同时刻颗粒空间分布演化：(a)-(f) 分别对应不同时刻的颗粒空间分布状态；红色为大粒径颗粒，蓝色为小粒径颗粒；底部比例尺为0.5 m

Fig. 5　Evolution of particle spatial distribution at different times: (a)-(f) correspond to different time instants; coarse particles in red, fine particles in blue; bottom scale bar = 0.5 m

状波动，150 μm曲线在模拟末期下折尤为明显。实验分析这主要是因为随着大量易上浮颗粒被逐步去除，钢液中残留该粒径颗粒数急剧减少，个别幸存颗粒在“上浮”与“湍流卷入”间的博弈主导了后期均值，这种波动正是中等粒径颗粒所处过渡临界状态的真实反映。

图6(b)进一步给出了不同粒径颗粒在液面的最终停留能力对比。需要指出的是，该图统计的是“模拟终态停留时间”，即从模拟结束时刻(1 200 s)向前倒推至颗粒最后一次低于阈值高度(Z<0.60 m)的持续时间。此处采用较宽松的Z=0.60 m阈值，旨在更宏观地捕捉颗粒向液面附近富集的分布趋势。50 μm颗粒的中位最终停留时间趋近于零，90%分位数仅为1.38 s，绝大多数颗粒在接触液面的瞬间便被钢液重新卷走；100、150 μm颗粒同样难以稳定停留，中位停留时间仅为0 、0.8 s；≥200 μm颗粒的中位最终停留时间均逼近1 200 s(即从模拟初期上浮后直至模拟结束几乎一直稳定滞留于液面附近)，这意味着大颗粒一旦抵达液面即可实现稳定驻留。

从图6(c)(d)捕获的时序统计可以看出，大尺寸颗粒的捕获频率与概率密度峰值均集中模拟初期(5~15 s)，之后快速回落至极低水平，反映出大颗粒一旦上浮即可快速脱离钢液；小尺寸颗粒的捕获频率与概率密度峰值出现在20~30 s，且存在极长拖尾直至模拟终结，说明小颗粒需在循环流裹挟下经历“上浮-卷入-再上浮”的多轮循环方能获得捕获机会。两条曲线形态高度一致，互为佐证，共同揭示了捕获事件随时间的粒径依赖性分布规律。

2.3.2　气泡捕获率与粒径的定量关系

表1统计了各粒径颗粒的具体捕获情况：气泡捕获量由50 μm的390个随粒径增大降至300 μm的198个；表面滞留基于颗粒在液面附近(Z≥0.65 m)的累计停留总时间≥500 s判定，以反映其在液面的驻留倾向，而非仅依赖模拟结束的瞬时状态。统计结果显示，50 μm颗粒累计停留时间从未达到阈值，表面滞留量为0；≥200 μm颗粒迅速攀升至811个后趋于饱和。综合去除率由50 μm的39.0%跃升至200 μm的82.1%后趋于稳定。需强调，该判据相当保守，仅作趋势性表征；其中50 μm颗粒未达阈值，但实际仍有44.02%通过自主上浮停留而去除(见2.4.3节)。100~150 μm的中等粒径颗粒表面滞留量有限，其行为仍以气泡捕获为主导；而200~300 μm的颗粒主要依赖表面滞留。气泡捕获率随粒径增大呈下降趋势，这是由于有效黏附因子随粒径增大而衰减，颗粒碰撞后成功黏附难度显著增加。

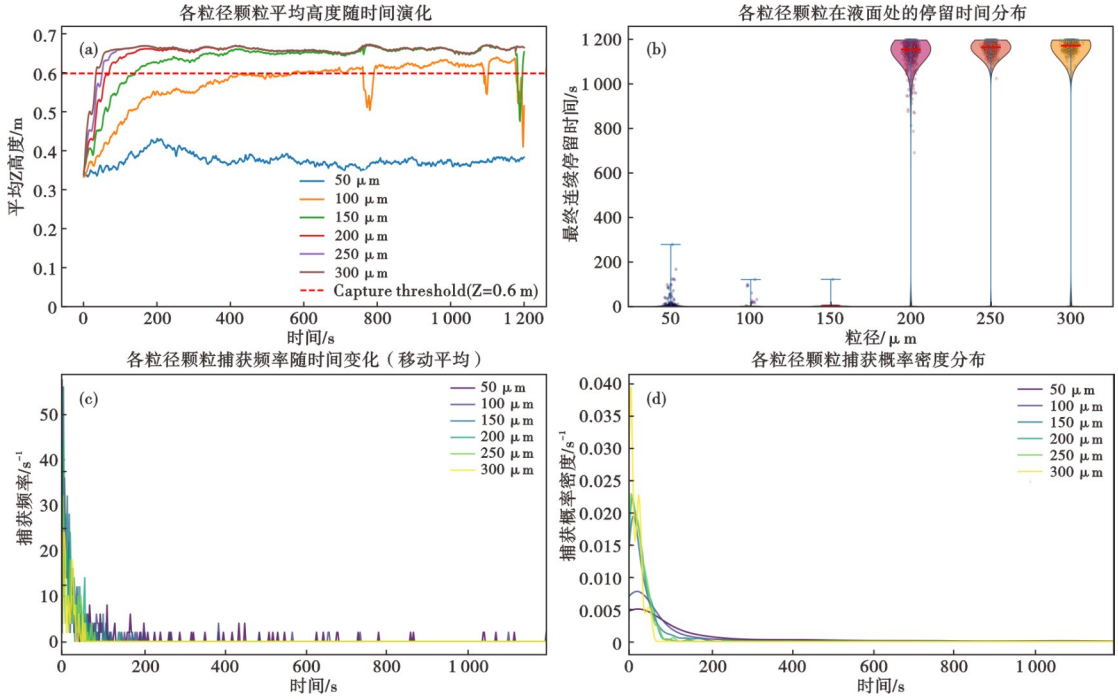


图6 不同粒径颗粒上浮行为与捕获时序特征:(a) 平均Z高度随时间演化,(b) 液面附近(Z < 0.60 m)最终连续停留时间分布,(c) 捕获频率随时间变化,(d) 捕获概率密度随时间分布

Fig. 6 Flotation behavior and capture temporal characteristics of particles with different sizes: (a) evolution of mean Z-height with time, (b) distribution of final continuous residence time near liquid surface (Z < 0.60 m), (c) capture frequency variation over time, (d) capture probability density distribution over time

表1 各粒径颗粒捕获率统计

Table 1 Capture statistics of particles with different sizes

直径/μm	Cap.[1]/个	Ret.[2]/个	Ovlp.[3]/个	Rem.[4]/%
50	390	0	0	39.0
100	362	575	269	66.8
150	329	783	321	79.1
200	305	811	295	82.1
250	243	813	239	81.7
300	198	794	189	80.3

注1:Cap. 气泡捕获数(个),指被UDF判定捕获的颗粒数。

注2:Ret. 表面滞留数(个),指颗粒在液面附近(Z≥0.65 m)累计停留总时间≥500 s的颗粒数。

注3:Ovlp. 交集数(个),指同时被气泡捕获和表面滞留的颗粒数。

注4:Rem. 保守口径的去除率,计算公式为(Cap. +Ret. −Ovlp.)/1 000×100%。

注5:本表Ret. 采用累计停留时间法(≥500 s),与2.4.3节连续停留时间法(≥30 s)判据不同。

图7展示了捕获事件沿钢包高度的分布,各粒径均呈现出由羽流区主峰(Z≈0.26 m)与液面区次峰(Z≈0.58~0.60 m)构成的双峰特征。随着粒径增大,双峰相对强弱显著反转:50 μm微细颗粒的羽流区主峰远大于液面区次峰,表明其捕获绝大多数发生在钢液深部羽流内部;≥200 μm大颗粒的液面区次峰则逐渐超越羽流区主峰,表明其捕获主要发生在液面附近。这一分布从空间维度解释了表1中捕获途径的粒径依赖性:大颗粒在浮力驱动下上浮至液面,因浮力占优且表面张力影响偏弱,能够稳定滞留;小颗粒无法在液面留存,被循环流拽回钢液深处,因此其去除必须依赖气泡在羽流区内的夹带捕获。

2.4 捕获机制的协同作用与转换规律

2.4.1 两条去除路径的相对重要性转变

图8呈现了各粒径颗粒在液面附近(Z≥0.65 m)历史最大连续停留时间的分布特点。该指标与图6(b)中反映模拟终态瞬时停留时间的宽松阈值(Z≥0.60 m)不同,此处采用更贴近真实液面(Z=0.68 m)的严格精细阈值,旨在精确判定颗粒是否实现了真正的稳定驻留;该指标反映颗粒的本质驻留能力,不受模拟时长截断效应影响。50 μm颗粒停留时长几乎紧贴0 s(90%分位数仅为0.40 s),直方图显极度偏左的单峰态,说明此类颗粒缺乏稳定驻留的条件。100 μm颗粒停留时间呈双峰格局(25%分位点处于0 s,75%分位点达441 s),该粒径属典型过渡区间。≥150 μm颗粒中位停留时长均大于465 s,整体分布大致集中在600~700 s。这些现象表明,小粒

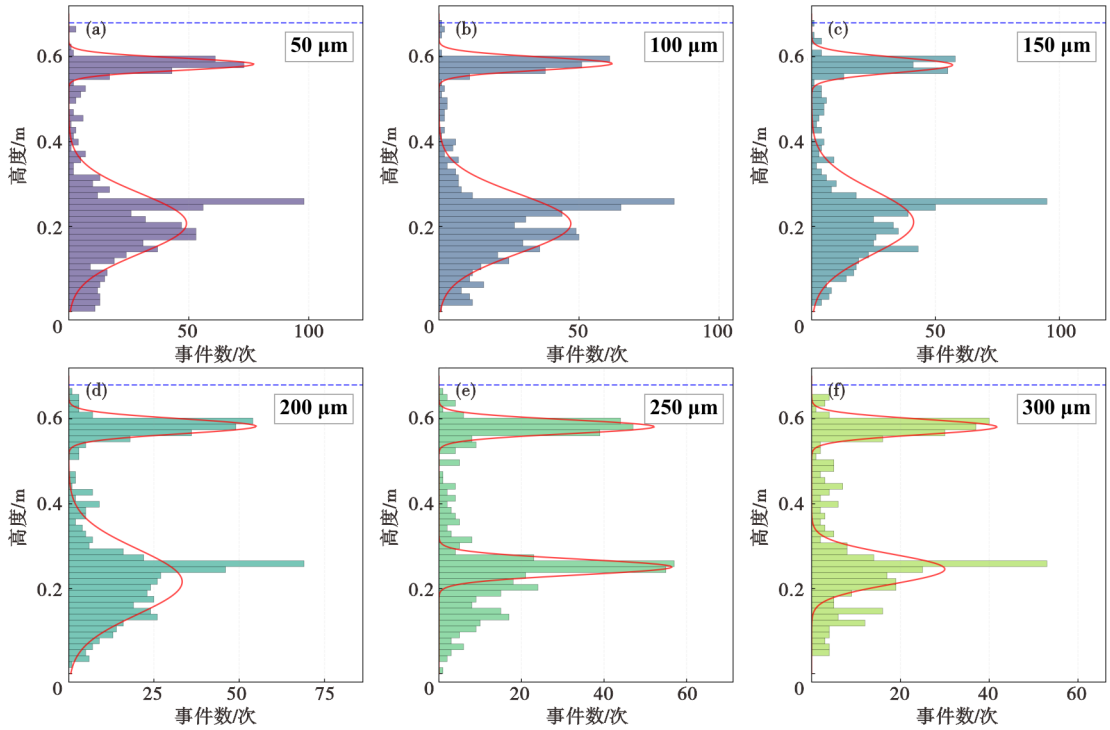


图 7　不同粒径颗粒捕获事件沿钢包高度分布：(a)-(f) 分别对应不同粒径颗粒(50~300 μm)的捕获事件沿高度分布；蓝色虚线为钢液面 Z = 0. 68 m；红色曲线为双峰高斯拟合

Fig. 7　Capture event distribution along ladle height for particles with different sizes: (a)-(f) correspond to particles with different diameters (50-300 μm); blue dashed line: steel free surface at Z = 0. 68 m; red curves: double-Gaussian fitting

径无法保持稳定停留，中等尺度处于过渡阶段，大粒径颗粒一旦贴近液面便能持久驻留。

对比 UDF 日志与颗粒轨迹，可将去除途径分为三类，如图 9 所示：50 μm 小颗粒主要依靠气泡捕获；100~150 μm 颗粒的去除途径开始向液面长时驻留倾斜；≥200 μm 颗粒则以液面长时驻留占绝对优势(液面长时驻留定义：模拟时间内 Z≥0.60 m 累计停留不少于 300 s)。上述转变说明，底吹氩对不同粒径所起的作用有很大差别：对于微细颗粒，底吹氩的夹带是其去除过程中必须经过的前提；而对于大颗粒，底吹氩起到的是辅助上浮的加速作用，最终去除仍以自身浮升并停留为主。具体来看，50 μm 颗粒被气泡捕获后能实现液面驻留的比例极低，说明气泡虽能把小颗粒带到表层，但受表面能垒抑制难以驻足。对于≥150 μm 颗粒，被气泡捕获的群体中绝大多数本身已处于液面附近，故两者在统计上高度重叠；而在液面长时驻留的颗粒里，曾被气泡捕获过的仅占 25%~43%。这组对比证实，对于较大尺寸夹杂物，表面滞留才是主导渠道，气泡捕获仅提供上浮加速作用。

2. 4. 2　表面稳定停留的关键瓶颈效应

图 10 展示了不同 Z 阈值下颗粒首次到达液面高度的时间分布。当 Z≥0.60 m 时，各粒径颗粒的首次到达时间差异不大，几乎均能在模拟初期(100 s 以内)到达该高度，说明该位置仍处于钢液内部上升流可轻易携带的区域；但当 Z 阈值提高至 0.65、0.67 m(愈趋近于真实液面 0.68 m)时，不同粒径颗粒的首次到达时间出现了明显分化：50~150 μm 颗粒的分布出现极长拖尾(部分甚至超过 1 000 s)，表明微细颗粒受湍流循环流裹挟，极难凭借自身浮力真正挤入液面表层；而≥200 μm 颗粒的首次到达时间始终高度集中于模拟初期(约 200 s 以内)，说明大颗粒具有明显的浮力优势，能较快穿越钢液内部并稳定驻留于液面表层。

表 2 的数据进一步印证了这一结论。对比不同粒径在 Z=0.55 m 到 Z=0.60 m 的数据可以发现，这个区间存在一个所谓的“空间缓冲带”，所有粒径在这里都有一定的驻留能力，大颗粒(≥150 μm)的 Mean 值甚至突破了 1 000 s。但是，把视线移到 Z=0.65 m (更贴近真实液面 0.68 m)时，粒径差异就体现出来了：50、100 μm 颗粒的 Mean 值像断崖一样掉到了

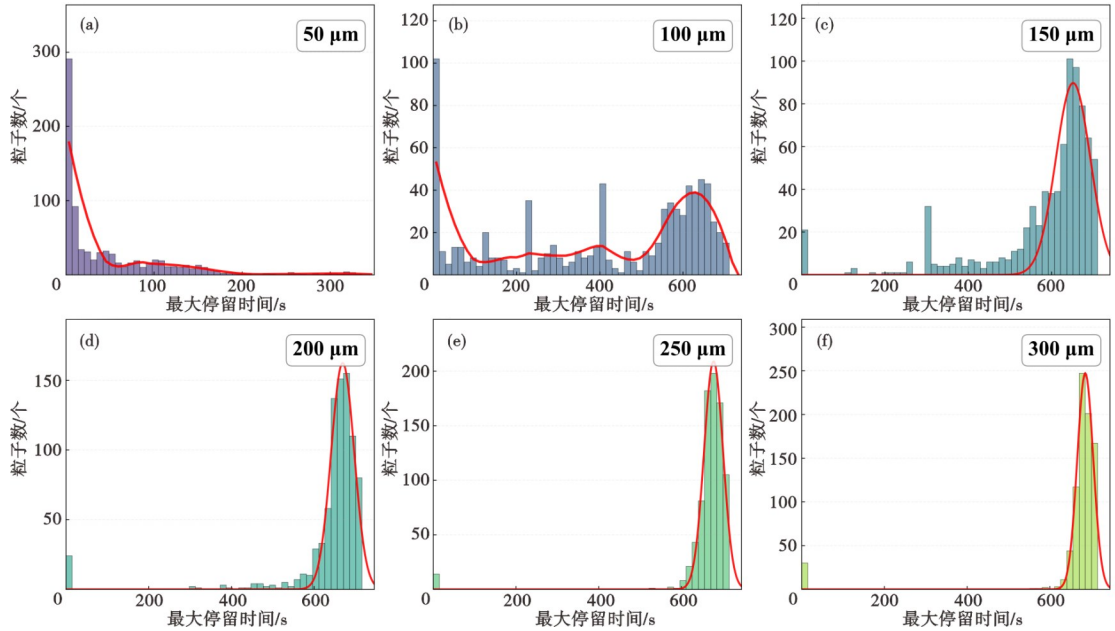


图8 不同粒径颗粒表面最大停留时间分布:(a)-(f)分别对应不同粒径颗粒(50~300 μm)的表面最大停留时间分布;红色曲线为智能平滑/高斯拟合结果(自动判断单峰/双峰)

Fig. 8 Maximum surface residence time distribution of particles with different sizes: (a)-(f) correspond to particles with different diameters (50-300 μm); red curves represent intelligent smoothing/Gaussian fitting (auto-detection of single/double peaks)

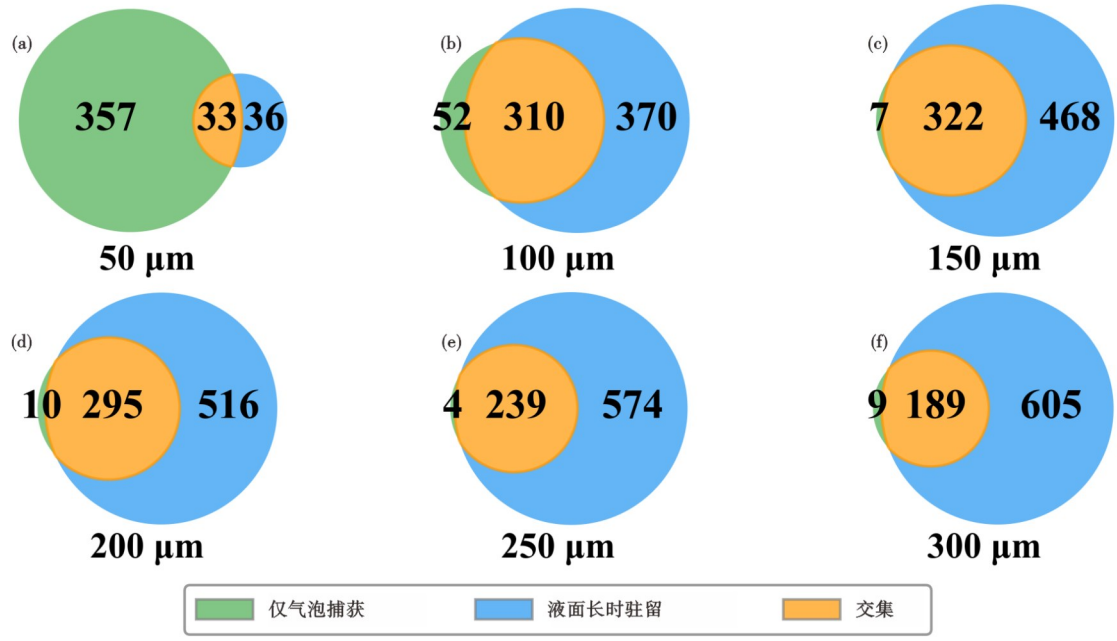


图9 不同粒径颗粒的捕获路径韦恩图:(a)-(f)分别对应不同粒径颗粒(50~300 μm)的捕获路径韦恩图

Fig. 9 Venn diagram of capture pathways for particles with different sizes: (a)-(f) correspond to particles with different diameters (50-300 μm)

49、399 s,这说明小颗粒的驻留高度依赖于底部的缓冲带,靠近表层就"站不住脚";而≥150 μm颗粒的Mean值仍保持在578~663 s,它们有足够的实力穿透表层并稳住。当Z阈值进一步拉高到0.67 m时,所有粒径都撑不住了,Mean值全部掉到个位数(7~34 s),到了Z=0.68 m(真实液面)则直接归零,这说明Z=0.68 m是不可逾越的物理边界。这种空间上的敏感性差异,比单一阈值的统计值更能直观揭示微细颗粒缺乏本质驻留能力,而大颗粒具备极强驻留优势的物理本质。

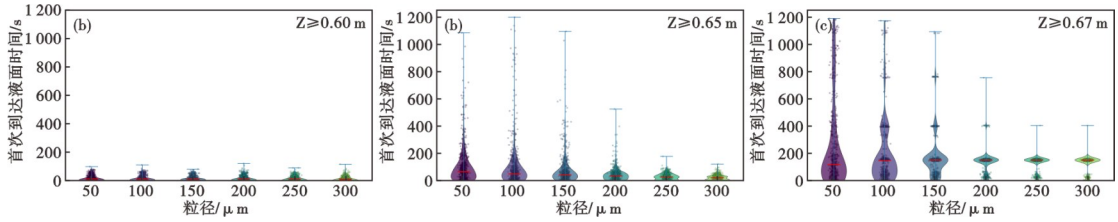


图 10　不同 Z 阈值下颗粒首次到达液面时间分布：(a)-(c) 分别对应不同 Z 阈值(Z ≥ 0. 60 m、Z ≥ 0. 65 m、Z ≥ 0. 67 m)下颗粒首次到达液面的时间分布；红色线为中位首次到达时间

Fig. 10　First arrival time distribution of particles at liquid surface under different Z thresholds: (a)-(c) correspond to different Z thresholds (Z ≥ 0. 60 m, Z ≥ 0. 65 m, Z ≥ 0. 67 m); red line represents median first arrival time

表 2　颗粒在不同 Z 阈值下的平均最长停留时间

Table 2　Mean maximum residence time of particles under different Z thresholds

直径/μm	不同Z阈值下的平均最长停留时间/s				
	0.55 m	0.60 m	0.65 m	0.67 m	0.68 m
50	75	67	49	7	0
100	492	470	399	13	0
150	1 043	1 040	578	25	0
200	1 117	1 116	637	34	0
250	1 147	1 146	663	25	0
300	1 133	1 133	658	29	0

注：表 2 统计了模拟时间(1 200 s)内，不同粒径的颗粒在液面附近(Z ≥对应阈值)的历史最大连续停留时间的算术平均值。该指标反映了颗粒在不同 Z 高度下的本质驻留能力，不受模拟结束时刻截断的影响。Z=0. 68 m 对应真实液面高度。。

图 11 给出 Z 方向的典型轨迹：200~300 μm 颗粒被捕获后快速上浮，轨迹单调上升，二者均体现大颗粒的强驻留能力；150 μm 颗粒需经历数次“上浮-卷入”循环后方才稳定，体现出明显的过渡临界特征；50 μm 颗粒则始终滞留在钢液中剧烈振荡。这些轨迹差异直观印证了前述统计分析结论。

2. 4. 3　气泡捕获与液面捕获的“去耦合”独立演化分析

需要指出的是，本节液面捕获率采用连续停留时间法(首次连续停留≥30 s)，与表 1 中采用的累计停留时间法(累计≥500 s)不同。连续法侧重刻画颗粒何时实现稳定驻留，能够直观展示液面捕获的时间演化规律；累计法侧重刻画颗粒的终态去除倾向性。两种方法从不同维度揭示了液面捕获的物理特征，构成互补。

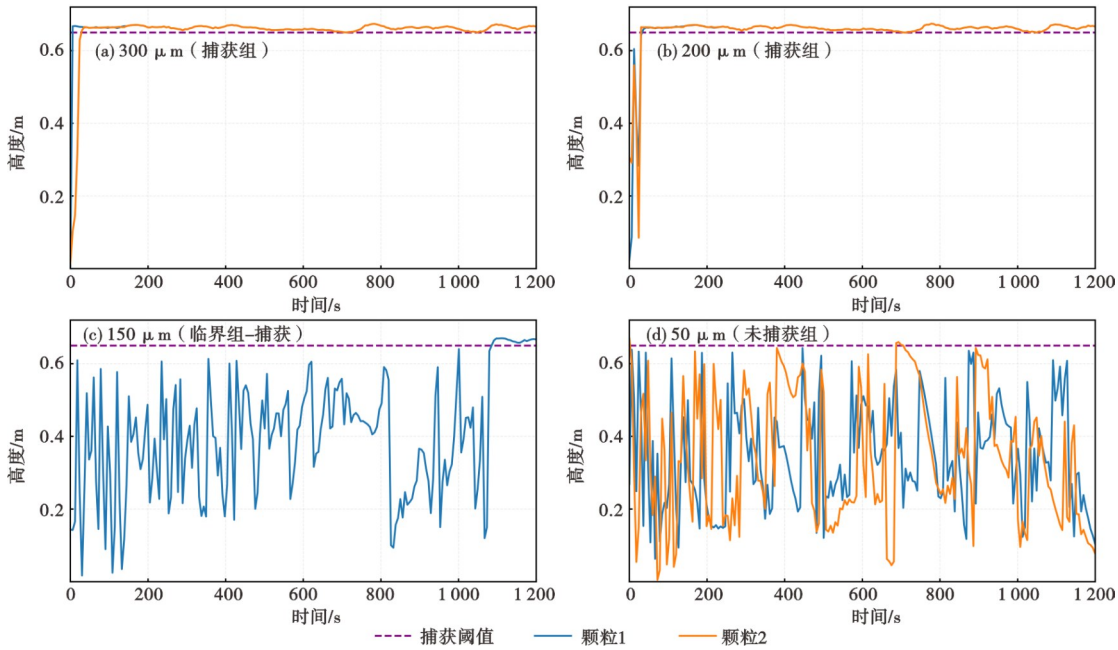


图 11　典型颗粒 Z 位置轨迹：(a)-(d) 分别对应不同粒径颗粒的典型 Z 位置轨迹，展示不同捕获状态(捕获、临界捕获、未捕获)；紫色虚线为捕获阈值

Fig. 11　Typical Z-position trajectories of particles: (a)-(d) correspond to typical Z-position trajectories of particles with different diameters, showing different capture states (captured, critical, not captured); purple dashed line: capture threshold

为厘清两种机制的分工,将气泡捕获与液面捕获视为两条独立路径,分别统计其演化趋势。气泡捕获由UDF实时判定;液面捕获定义为颗粒在Z≥0.65 m处连续停留≥30 s的起始时间。需注意,为排除气泡捕获干扰,液面捕获率的统计仅针对从未被气泡捕获的"幸存"颗粒,分母为排除气泡捕获后的剩余颗粒数(1 000个 - 气泡捕获数)。该判据反映了颗粒克服湍流剪切、实现稳定黏附的过程[21],因此,该液面捕获率表征颗粒在无气泡辅助条件下的"自主上浮能力"。

图12(a)中可以看到一种很典型的"前期快、后期稳"的趋势:≥200 μm颗粒在30 s内就接近饱和了,约30%;而50 μm颗粒则一直是缓慢往上爬,到1 200 s时才到39.0%。大颗粒浮力大、上浮快,气泡捕获机会集中前期;小颗粒浮力不足,需多次循环,气泡捕获贯穿整个周期。

图12(b)反映出一个很重要的差异:对于≥150 μm的"幸存"颗粒,液面捕获率在200 s内迅速攀升至75%~98%,1 200 s时接近100%——未被气泡捕获的大颗粒几乎全部自主上浮至液面并被捕获,去除率接近100%;相比之下,50 μm颗粒液面捕获率仅44.02%,自主上浮能力极弱,必须依赖气泡捕获。

实验表明,气泡捕获主导模拟前期,液面捕获主导模拟后期。两条路径的相对重要性随粒径发生显著转变:大颗粒凭借自身浮力即可实现去除,而微细颗粒必须依赖气泡携带与多次循环捕获的共同作用。这种"去耦合"分析从时间维度清晰说明了不同粒径夹杂物的去除机理。

2.5 工业应用推演

假定夹杂物去除速率与当前悬浮浓度成正比(遵循"宏观均匀混合"假设[2,18]),其动力学过程可由反应速率方程描述。对于标准一级动力学,速率常数为常数,其解为指数衰减形式。然而,钢包内气泡捕获过程存在明显的"前期快速、后期缓慢"特征——大颗粒因浮力主导,捕获集中于模拟初期;小颗粒因循环流裹挟,捕获贯穿整个模拟周期。本研究采用广义饱和指数模型描述微细颗粒的去除动力学,其中渐近极限为颗粒的最终去除率,速率常数和形状参数共同控制曲线的形态(当形状参数为1时退化为标准一级动力学)。

实际吹氩时长(120 min)远超模拟时长(20 min)。由图12可知,气泡捕获率与液面捕获率均已接近饱和,其去除率在1 200 s时已接近饱和。本研究的动力学外推仅针对50~100 μm的微细颗粒,其后续的深度去除依赖长时间的气泡携带与液面滞留的持续累积效应。

基于捕获率数据,结合广义饱和指数模型,可求出各粒径颗粒的模型参数。本研究提取模拟过程中多个离散时间节点的去除率数据,利用该组离散数据对广义饱和指数模型进行非线性拟合,得到各粒径曲线的决定系数均在0.98以上,验证了利用稳态数据进行外推具有坚实的统计学基础,如图13所示[22]。将模型外推至本研究对标工业装备的实际精炼时长2 h(7 200 s)时,50 μm微细颗粒的气泡捕获率可达40.01%,液面捕获率可达54.91%;100 μm颗粒的气泡捕获率可达36.21%,液面捕获

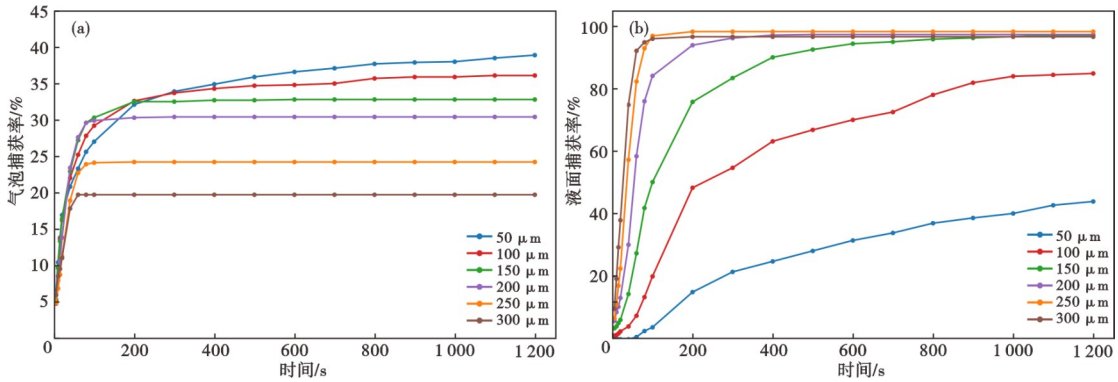


图12 气泡捕获率与液面捕获率随时间演化曲线:(a)-(b)分别对应气泡捕获率和液面捕获率(不含气泡捕获)随时间演化曲线,六条曲线分别对应50~300 μm颗粒;液面捕获定义为颗粒在Z≥0.65 m处连续停留30 s的开始时刻(分母为排除气泡捕获后剩余颗粒数)

Fig. 12 Evolution of bubble capture rate and surface capture rate over time: (a)-(b) correspond to bubble capture rate and surface capture rate (excluding bubble capture), respectively; six curves correspond to particles of 50-300 μm; surface capture is defined as the start time when a particle stays continuously for 30 s at Z ≥ 0.65 m (the denominator is the number of remaining particles after excluding bubble-captured particles)

率可达94.85%。结合图13中气泡捕获率与液面捕获率的渐近极限，还可计算微细颗粒在精炼终点的综合去除率，其中气泡捕获率的渐近极限与液面捕获率的渐近极限通过组合关系确定。代入拟合参数可得，50 μm颗粒在2 h后的综合去除率为72.93%，100 μm颗粒为96.70%。由外推曲线进一步可知，微细颗粒若要达到同等去除效果，所需精炼时间远长于大颗粒，这明确反映出精炼时长是制约微细颗粒去除的关键瓶颈。

为验证模型实用性，将模拟工况对标某2 t级真空连铸装备生产FGH4097高温合金的实际精炼参数（1 530 ℃，0.6 Pa）。经大样电解法实测，传统工艺下该钢种夹杂物水平约为2 mg/10 kg，引入底吹氩后可降至0.4 mg/10 kg（远优于行业限值4 mg/10 kg）。图14为大样电解提取的夹杂物实物照片与SEM形貌，从中可以清晰观察到不规则形状的宏观夹杂物及微观下的团聚结构。需说明，离线大样电解法受限于检测成本与样品量，无法对分粒径去除率进行直接统计验证；本研究的数值模拟恰好为在工业统计手段受限条件下理解分粒径去除机理提供了补充性的定量认知，且该显著降幅与模拟结论的趋势高度一致，验证了模型在实际工程应用中的可靠性与指导意义。

3　结论

基于VOF-DPM耦合方法构建了底吹氩钢包三维模型，引入粒径差异化捕获概率，针对6组粒径（50~300 μm）颗粒，探究了气泡捕获与表面滞留的去除机制。主要结论如下：

1）建立了有效黏附因子计算式：$P_{attach}=\exp\left[-0.8\left(d_p/150\right)^{0.6}-0.8\left(d_p/150\right)^{2}\right]$，该式表明有效黏附概率随粒径增大呈非线性递减。将该模型通过UDF用于实时气泡捕获判定，网格与时间步长的离散误差均控制在3%以内。

2）捕获机制随粒径由“气泡捕获”向“表面滞留”转换。50 μm小颗粒需多次循环方能去除；≥200 μm大颗粒综合去除率达82.1%，其中表面滞留占60%以上，上浮后即可稳定去除。

3）表面稳定停留是微细颗粒去除的关键瓶颈。50 μm颗粒在液面的平均最长停留时间仅为49.3 s，而≥150 μm颗粒则超过578 s。微细颗粒因本质缺乏在液面的有效驻留能力，其去除必须依赖底吹氩提供的多次循环捕获。

4）“去耦合”分析表明，气泡捕获主导模拟前期（0~100 s），液面捕获主导模拟后期（100~1 200 s）。

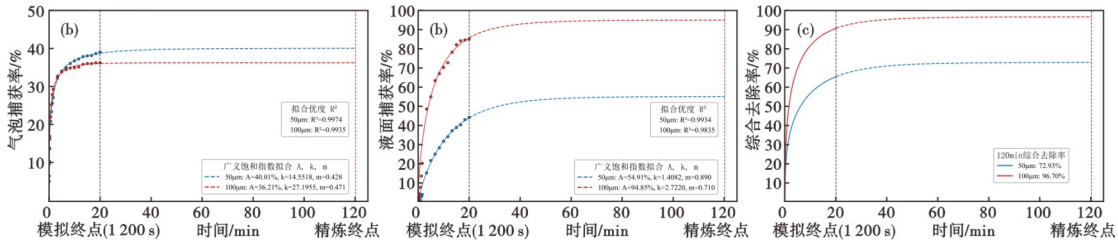


图13　小尺寸颗粒去除率随时间演化外推曲线：(a)-(c)分别对应不同去除路径的去除率随时间演化曲线；实线为模拟结果（0~1 200 s），虚线为外推结果（至2 h）

Fig. 13　Extrapolated curves of removal rate evolution with time for fine particles: (a)-(c) correspond to different removal pathways; solid lines: simulation results (0-1 200 s), dashed lines: extrapolation (up to 2 h)

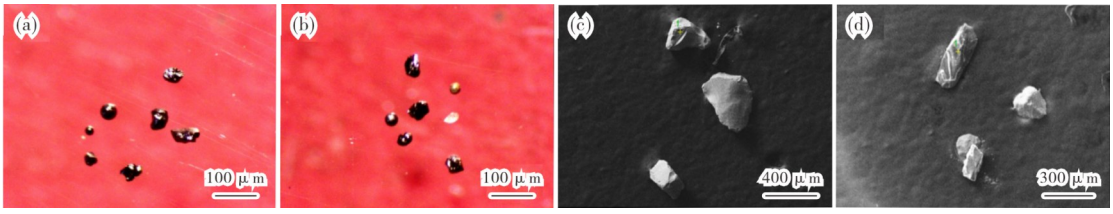


图14　实际生产FGH4097高温合金夹杂物形貌：(a)(b)大样电解提取的宏观夹杂物实物照片，呈不规则形状；(c)(d)夹杂物微观SEM形貌，可见典型的复杂团聚结构

Fig. 14　Morphology of inclusions in industrial FGH4097 superalloy: (a) (b) macroscopic inclusions extracted from the alloy by large-sample electrolysis, exhibiting irregular shapes; (c) (d) typical SEM micrographs of the extracted inclusions, revealing complex agglomerated structures

对于50 μm颗粒,气泡捕获率为39.0%,液面捕获率为44.02%,外推至2 h后综合去除率可达72.93%;100 μm颗粒综合去除率可达96.70%,≥150 μm颗粒综合去除率均接近100%。

参考文献

[1] Zhang L, Taniguchi S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation[J]. International Materials Reviews, 2000, 45(2): 59-82.

[2] 朱苗勇, 萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.

[3] 熊星强, 李长荣, 陈龙海, 等. 稀土钇对高碳硬线钢中氧化铝夹杂物的改性研究[J]. 稀有金属, 2024, 48(4): 508-516.

[4] 赵 博, 吴 伟, 杨 峰, 等. La元素对Q355钢中夹杂物和微观结构的影响[J]. 稀有金属, 2025, 49(5): 657-668.

[5] 李 琦, 邱国兴, 王恭亮, 等. 130 t钢包底吹氩工艺数值模拟[J]. 特殊钢, 2024, 45(5): 59-65.

[6] 秦绪锋, 王凤良, 程常桂, 等. 底吹氩钢包内流动及界面传热行为的数值模拟研究[J]. 炼钢, 2024, 40(5): 49-59.

[7] 冯 巍, 张志霄, 屈天鹏, 等. 底吹钢包流体流动与壁面侵蚀行为数值模拟[J]. 工业加热, 2026, 55(3): 55-60+65.

[8] 徐 涛, 邓安元, 李 阳, 等. 连铸结晶器内Ar气泡破碎-聚合和捕获行为的数值模拟[J]. 金属学报, 2025, 61(12): 1895-1910.

[9] Mazumdar D, Guthrie R I L. The physical and mathematical modelling of gas stirred ladle systems[J]. ISIJ International, 1995, 35(1): 1-20.

[10] Sheng D Y, Söder M, Jönsson P, et al. Modeling micro-inclusion growth and separation in gas-stirred ladles[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2002, 31(2): 134-147.

[11] Liu K, Zhang L, Cui H N, et al. Simulation of inclusion removal in bottom-blowing ladle with tracking the collision of inclusions and bubbles in transient time steps[J]. ISIJ International, 2023, 63(10): 1677-1686.

[12] 张利超, 方 庆, 周文浩, 等. 底吹氩钢包内废钢熔化行为的数值模拟[J]. 工程科学学报, 2024, 46(5): 822-834.

[13] 王 宁, 秦德越, 李宝宽, 等. LF精炼过程中通电升温阶段底吹氩方式的优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 507-513.

[14] 杨风国, 王晓英, 周明星, 等. 不同钢包底吹氩模式对钢液精炼效果的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 54-60.

[15] 杨亚迪, 赵 晶, 崔剑征. 三相氩气搅拌钢包内界面行为及混合现象的数值模拟[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(5): 138-148.

[16] 黄 凯. 60 t钢包底吹氩渣金流动及夹杂物运动行为模拟研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.

[17] 刘玉平. 120吨LF炉精炼过程钢液流场数值模拟[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.

[18] 赵建鹏, 唐国章, 曾亚南, 等. 100 t钢包底吹氩搅拌钢液去除夹杂物数值模拟研究[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 31-38.

[19] Ralston J, Fornasiero D, Hayes R. Bubble–particle attachment and detachment in flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 1999, 56(1-4): 133-164.

[20] 张志军, 黄旭贝. 湍流环境下颗粒与气泡黏附过程的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2057-2066.

[21] Kumar D, Ahlborg K C, Pistorius P C. Development of a reliable kinetic model for ladle refining[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(5): 2163-2174.

[22] Huang C D, Duan H J, Zhang L F. Modeling of motion of inclusions in argon-stirred steel ladles[J]. Steel Research International, 2024, 95(11): 2300537.