· XXXX ·

真空水平连铸高温合金底吹氩去除夹杂物机制

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

摘　要：以FGH4097高温合金返回料为研究对象，基于2 t真空水平连铸装备，采用底吹氩工艺开展高纯熔炼实验，通过高温可视化原位观测记录了气泡上浮、穿越熔池界面及破裂全过程，结合热传导方程的有限差分数值模拟，系统研究了底吹氩条件下气泡对熔体温度场、黏度场的扰动规律及其对夹杂物携带去除的作用机制。实验发现，熔体温度是决定气泡界面穿越行为的关键因素：当温度处于1 550~1 500 ℃时，气泡因表面张力不足难以突破熔池顶部界面，上浮净化效率受限；当温度降至1 500 ℃以下时，气泡周围形成显著的热影响区，局部熔体黏度增大，增强了对夹杂物的黏附捕获能力，气泡能够以稳定形态携带夹杂物穿越界面并在真空环境下破裂，随后夹杂物被熔渣或坩埚壁吸附去除。数值模拟结果表明，气泡进入熔体后，其内部及周边区域在数秒内保持明显低于熔体的温度，形成径向温度梯度，对应黏度呈局部升高分布，与实验观测现象一致。研究揭示了气泡携带夹杂物上浮去除遵循热黏附、界面吸附与机械裹挟三重耦合机制，明确了温度场-黏度场-气泡行为协同作用下的夹杂物净化规律。该成果为真空水平连铸底吹氩工艺的温度区间选择、吹气参数优化及返回料高纯化处理提供了理论依据和工艺指导。

关键词：高温合金；真空水平连铸；底吹氩；气泡动力学；夹杂物去除；热传导数值模拟
DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260142　　**中图分类号：**TF769；TG146

Inclusion Removal Mechanism by Bottom-Blown Argon in Vacuum Horizontal Continuous Casting of Superalloys

Hao Zhibo, Li Shangping, Li Zhiqi, Luo Heli, Wang Shuo
(Beijing Cisri-Gaona Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: This study focuses on FGH4097 superalloy revert scrap. Based on a 2 t vacuum horizontal continuous casting facility, high-purity melting experiments were conducted with bottom-blowing argon. The entire process of argon bubble rising, crossing the melt pool interface, and bursting was recorded by high-temperature in-situ visual observation. By combining finite-difference numerical simulations of the heat conduction equation, the disturbance patterns of the temperature and viscosity fields caused by the bubbles and their influence on inclusion removal were systematically investigated. Experimental results show that melt temperature is the key factor governing bubble interfacial crossing behavior. In the range of 1 550 ℃-1 500 ℃, bubbles struggle to break through the top interface due to insufficient surface tension, leading to limited flotation purification efficiency. When the temperature drops below 1 500 ℃, a pronounced heat-affected zone forms around the bubbles, increasing the local melt viscosity, which enhances the adhesion and capture of fine inclusions. Bubbles can then stably carry inclusions across the interface and burst under vacuum, after which the inclusions are adsorbed by slag or crucible walls for removal. Numerical simulation results indicate that upon entering the melt, the bubble interior and its surrounding region maintain a significantly lower temperature than the bulk melt for several seconds, thereby forming a radial temperature gradient, with a corresponding localized increase in viscosity, which agrees well with experimental observations. The study reveals that inclusion removal by bubble flotation follows a triple coupling mechanism: thermal adhesion, interfacial adsorption, and mechanical entrapment. It clarifies the purification mechanism under the synergistic effect of temperature field, viscosity field, and bubble behavior. The findings provide a theoretical basis and process guidance for temperature range selection, argon blowing parameter optimization, and high-purity recycling of superalloy revert scrap in vacuum horizontal continuous casting.

Key Words: Superalloy; Vacuum Horizontal Continuous Casting; Bottom-Blowing Argon; Bubble Dynamics; Inclusion Removal; Numerical Simulation of Heat Conduction

高温合金是航空发动机、燃气轮机等高端装备热端部件的核心材料，其服役性能与可靠性对材料洁净度依赖度高。非金属夹杂物是疲劳裂纹的主要萌生源，严重降低合金的疲劳性能、服役寿命等，制约高端装备的安全服役能力[1-4]。

随着航空航天、能源领域等的快速高质量发

基金项目：国家重点研发计划（2022YFC3902002）
作者简介：郝志博（1987—），男，博士，高级工程师；　**E-mail:**386098874@qq.com；　**收稿日期：**2026-09-12
Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

展，对高温合金需求量逐年递增，随之而来的是返回料的形成量逐年增加，造成制备成本大幅度增加[5]。这也加剧了对高温合金高品质低成本控制需求，作为高温合金部件源头，高品质低成本母合金制备，成为制造企业发展方向之一。

返回料的高品质循环利用是解决该问题的有效途径，这对高温合金返回料净化处理技术提出更高的要求[6-7]。既能够高效脱除高温合金返回料熔体中夹杂物和O、N等有害杂质元素，又能够以单联短流程工艺实现高温合金返回料母合金低成本高洁净制备。

真空连铸集成净化技术的出现，良好地解决了返回料低成本高洁净制备技术瓶颈，如图1所示，该技术以单联制备工艺集合真空感应熔炼和熔渣捕集等多联净化技术优势，不仅能够实现高温合金返回料短流程低成本净化处理，而且能够进一步提高新料母合金品质和冶金质量。

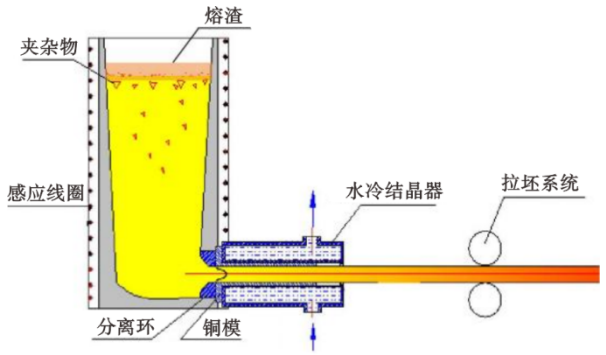


图1　真空连铸集成净化技术

Fig. 1　Integrated purification technology for vacuum horizontal continuous casting

真空连铸兼具了底铸高洁净制备优势[8-9]，高温合金中大多数夹杂物低于熔体密度，大尺寸夹杂物依靠静力上浮至熔体顶部，但小尺寸和高比重夹杂物上浮困难，依托连铸底铸工艺，在真空连铸装备集成底吹氩高纯熔炼技术，利用底吹氩进一步促进高温合金熔体夹杂物的上浮，实现熔体的深度进化。

底吹氩工艺在钢铁的净化处理应用相对成熟，而且底吹氩上浮夹杂物研究相对较多，但多集中在两个方面：1）物理法模拟底吹氩上浮夹杂物，主要以水模拟的物理方式来观察推演底吹氩上浮夹杂物过程及原理[10-13]；2）软件模拟底吹氩上浮夹杂物过程及研究推测其机理[14-16]。这两种模拟方式实际上多以流体流场考虑，来分析气泡、熔体与夹杂物三者之间的交互作用，进而解释底吹上浮氩夹杂物机制，研究较深地还分析了夹杂物在单个气泡附近如何排除液相被气泡裹挟携带上浮去除机制；但物理模拟和大多数的数值模拟往往仅考虑流场，而底吹氩气泡上浮过程中，流场作为关键因素外，温度场也是不能忽略另一因素。

实验基于真空连铸集成净化装备，针对装备中底吹氩高纯熔炼单元及工艺，结合数值计算与传热分析，详细阐述了底吹氩过程中，气泡利用温差和传热如何高效捕集夹杂物机制，为底吹氩气泡高效携带上浮夹杂物机制提供有力地试验基础。

1　实验材料与研究方法

以FGH4097合金成分见表1，返回料中的粗粉与块料为实验原料，按照粗粉∶块料=3∶7的质量配比开展实验。实验工作在2 t真空水平连铸进行，该炉体内径2 300 mm，高度8 000 mm，采用真空感应熔炼方式进行合金熔化与精炼过程，返回料加入量1 500 kg，待返回料全熔，在1 580~1 600 ℃温度下精炼，完成后，采用底吹氩工艺进行高纯熔炼，其原理图如图2所示，底吹氩工艺主要实施时间段是在熔体起铸前的降温过程，在线实时监测功能跟踪温度变化，每间隔5 ℃记录，或观察到底吹氩气泡状态发生显著改变时记录温度。底吹氩流量采用10 L/min，喷口面积2 mm^2，底吹温度范围1 550~1 400 ℃。气泡上升过程所用时间记录，以阀门打开为开始计时，第一个气泡冒出熔池计时结束。

表1　FGH4097合金成分（质量分数）

Table 1　Chemical composition of FGH4097 alloy　%

C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Hf	Zr	B
0.04	9.00	15.75	4.35	3.85	5.05	1.80	2.60	0.25	0.013	0.011

气泡与熔体导热及温度变化过程数值计算采用python软件（版本），熔体采用FGH4097熔体物性参数，初始状态1 500 ℃。气泡采用氩气物性参数，初始状态为室温进行计算。

2　结果与分析

图3所示为1 550~1 500 ℃底吹氩气泡上浮至熔池顶部时状态（该温度区间随合金成分等影响会有波动），由于合金熔体温度高，熔体表面张力和黏度相对较低，气泡上浮至熔池顶部界面时，气泡壁表面张力难以克服熔池顶部界面张力、熔体重力等

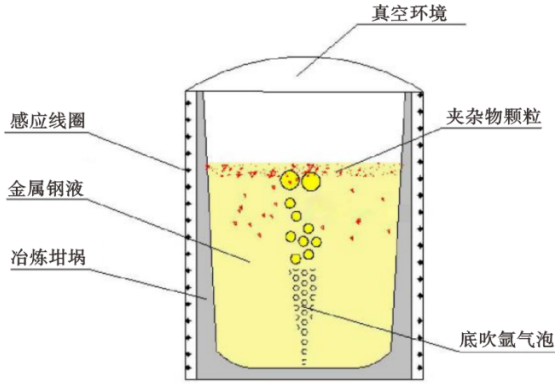


图2 底吹氩高纯熔炼示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high purification technology with bottom argon blowing

形成的合力,无法突破熔池界面形成稳定气泡浮于熔池顶部,降低了气泡携带夹杂物上浮至熔池顶部效率,其机理如图4所示。图3和图4分别在该温度段内气泡上浮熔池顶部两种情况:1)气泡部分在熔池顶部界面以上开始破裂;2)气泡与熔池顶部界面刚接触开始破裂,主要受气泡上浮速度和熔体温度影响。如图4所示,该温度段内气泡携带夹杂物难以克服熔池顶部界面的张力促进夹杂物高效上浮至熔池界面。

当温度降低至1 500 ℃以下时,随着温度的降低,气泡对其周围附近熔体温度产生的影响较大且持续时间增加,受气泡温度的影响其周围熔体温度会在一定时间内保持相对较低温度,在气泡周围会形成一层薄的热影响区,如图5所示,此时这部分熔体的黏度和表面张力会随着温度的降低而提高,气泡附近熔体黏度的增加,增加其在运动过程的黏附

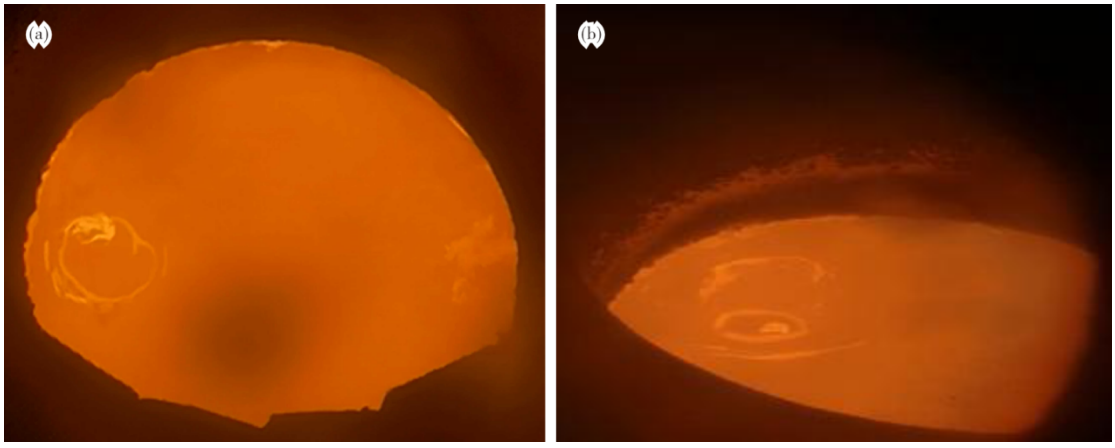


图3 1 550~1 500 ℃底吹氩气泡上浮至熔池顶部时状态:(a)在熔池顶部界面以上破裂气泡,(b)与熔池顶部界面刚接触开始破裂气泡

Fig. 3 States of bottom-blown argon bubbles rising to the top of molten pool at 1 550-1 500 ℃: (a) rupturing bubble above the top interface of the molten pool, (b) bubble beginning to rupture upon initial contact with the top interface of the molten pool

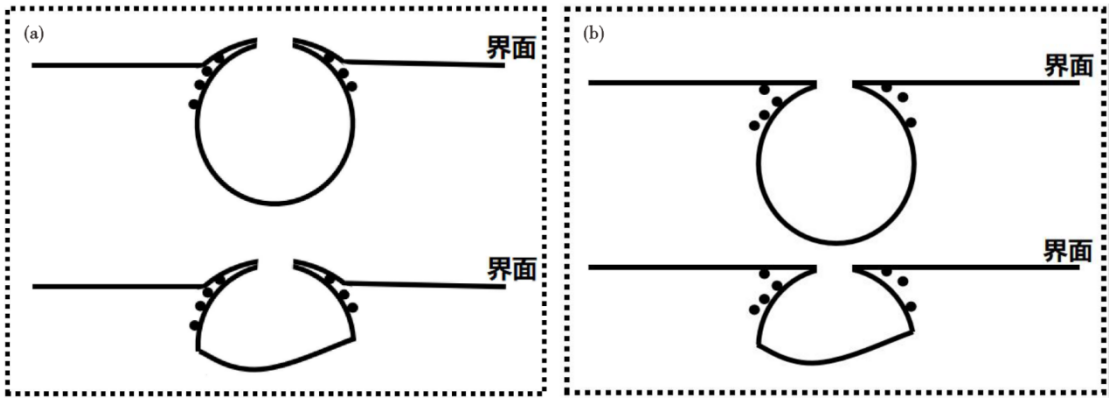


图4 1 550~1 500 ℃底吹氩气泡上浮至熔池顶部原理图:(a)在熔池顶部界面以上破裂气泡,(b)与熔池顶部界面刚接触开始破裂气泡

Fig. 4 Schematic diagram of bottom-blown argon bubbles rising to the top of molten pool at 1 550-1 500 ℃: (a) rupturing bubble above the top interface of the molten pool, (b) bubble beginning to rupture upon initial contact with the top interface of the molten pool

摩擦力，黏附摩擦力的增加较大程度提高了气泡附近熔体对夹杂物的交互作用与交互时间，这促进了气泡上浮过程携带夹杂物的概率，随着底吹氩时间的延长，进一步提高了熔体的净化效率。而气泡表面的液膜表面张力的增加，能够促进裹胁及杂物的气泡突破熔池顶部液面的表面张力，进而使夹杂物上浮至熔池顶部，此时，熔池顶部气泡状态如图6所示，上升至熔池顶部气泡形貌如图7所示，从图7中可以看出，突破熔池顶部界面气泡液膜表面存在一定数量夹杂，部分呈赤白色，部分气泡表面暗黑色。

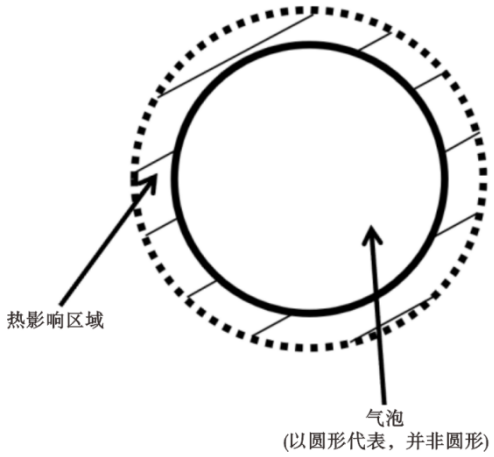


图5　气泡周围热影响区示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the heat-affected zone around the bubble

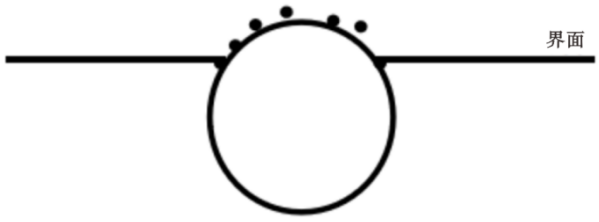


图6　气泡携带夹杂物上浮至熔池顶部示意图

Fig. 6　Schematic diagram of bubbles carrying inclusions rising to the top of the molten pool

为了进一步阐明气泡携带夹杂物上浮过程，记录气泡裹挟夹杂物上浮至熔池顶部过程试验，如图8所示，当温度降至1 500 ℃以下时，随着底吹氩工艺进行，底吹气泡对其附近熔体温度产生较大影响，进而影响其附近熔体黏度增大，此时，随着气泡上升过程，气泡附近熔体增大的黏度力，极易黏附其周围小尺寸夹杂物，进而裹挟夹杂物上浮至熔池顶部，当气泡上浮接近熔池顶部时，如图8(a)所示，气泡内部在熔池顶部投影呈暗色，气泡边缘附近投影呈赤白色，与熔体赤红色存在明显差异，这主要受温度的影响，随着气泡接近熔池顶部时，其温度场和能量场的影响直接造成气泡整体投影方向的熔池呈现不同色差。随着气泡接触熔池顶部，受气泡对其周围热影响区熔体的温度影响，该区域液膜形成的黏附摩擦力及气泡的表面张力足以克服熔池顶部表面张力，进而气泡以“黑泡”形式携带夹杂物突破熔池顶部界面，如图8(b)所示，此时夹杂物仍被吸附于气泡表面。随着气泡完全暴露在熔池顶部时，此时熔池顶部上方处于真空状态，气泡内部压力克服气泡表面张力进而发生破裂，如图8(c)所示，但受气泡表面张力作用，气泡表面膜仍收缩凝聚成一体，受这一影响，直至破裂气泡膜汇聚至一体时，其吸附携带夹杂物亦即跟随气泡膜发生汇聚，如图8(d)所示。当气泡张力引发夹杂物汇聚后，夹杂物未有足够时间发生物理化学反应而产生熔融等反应，但受熔体流动再次分散，如图8(e)所示。最后随着熔体横向流动扰动，进而移动至熔渣或坩埚壁附近，这些夹杂物长时间附着于顶部熔渣或坩埚壁在长时间高温作用下，发生化学和物理反应进而被熔渣和坩埚壁吸附，起到净化熔体的目的。

经过真空连铸精炼与底吹氩高纯熔炼后，将连铸成型母合金棒料、FGH4097粗粉返回料、FGH4097块状返回料进行O、N含量分析，同时进行大样电解夹杂物检测，其结果见表2。从表2中可以看出，粗粉和块状返回料的O、N含量均高于连铸返回料母合金，尤其是w[O]从$>10\times10^{-6}$经真空感应熔炼和底吹氩高纯熔炼技术净化处理后降至$<10\times10^{-6}$，且大样电解夹杂物含量降低至原来块料返回料的1/3，充分显示出底吹氩高纯熔炼过程中对夹杂物上浮作用。

为了进一步验证气泡在熔体中对周围温度场的影响，基于傅里叶热传导方程[17]，采用有限差分法(Finite Difference Method，FDM)对气泡－熔体体系的传热过程进行数值求解，并结合Python软件编程实现温度场演化计算与可视化[18]。计算中作如下简化：以球形1/4区域为计算域，仅考虑静态导热，忽略对流影响；实际操作中对流与静态导热的叠加效应可等比例折算为等效静态导热系数。

在球对称假设下，热传导控制方程如式(1)。

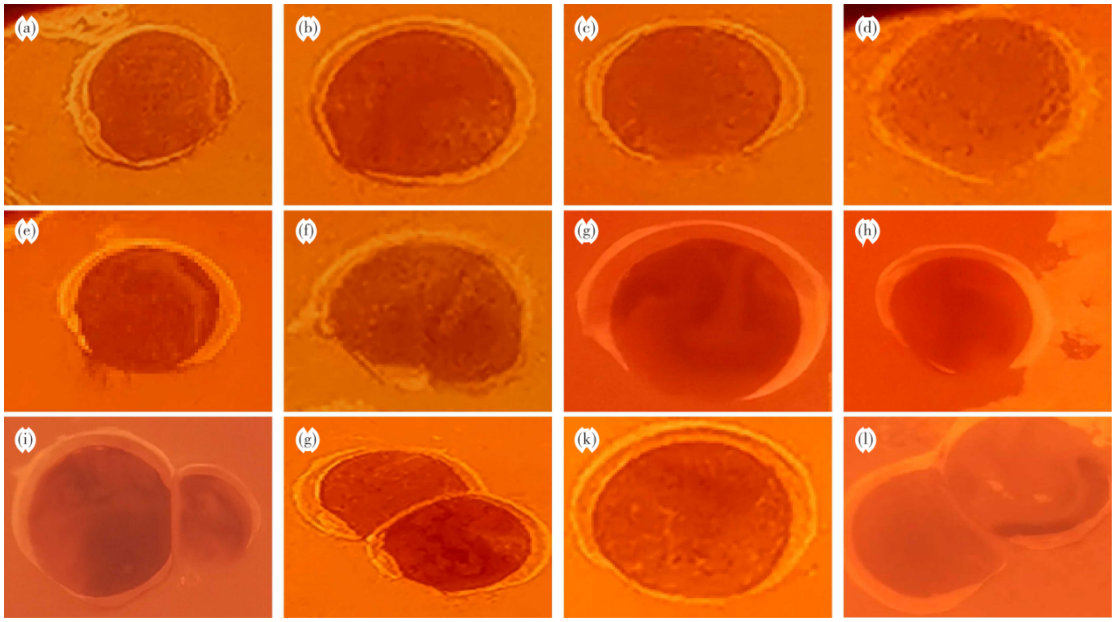


图7 不同温度时上浮至熔池界面气泡表面夹杂形貌:(a)-(d)>1 450~1 500 ℃;(e)-(h)>1 400~1 450 ℃;(i)-(l)≈1 400 ℃

Fig. 7 The morphology of bubbles at the interface of the molten pool when rising at different temperatures and the presence of inclusions on the bubble surface:(a)-(d)>1 450-1 500 ℃;(e)-(h)>1 400-1 450 ℃;(i)-(l)≈1 400 ℃

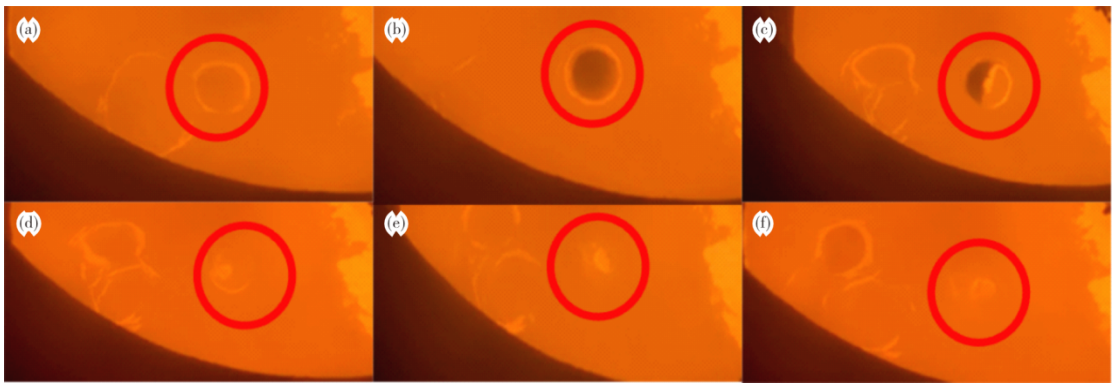


图8 气泡携带夹杂物上浮至熔池顶部过程图:(a) 气泡接近熔池界面;(b) 气泡突破熔池顶部界面,浮于界面上方表现黑泡;(c) 气泡破裂;(d) 气泡破裂后,气泡膜携带夹杂聚集随膜表面张力聚集;(e) 表面张力消失,夹杂分散;(f) 夹杂随横向液流流动至熔渣或坩埚壁附近,而后被吸附

Fig. 8 Process diagram of bubbles carrying inclusions rising to the top of the molten pool: (a) bubble approaching molten pool interface; (b) bubble breaking through the top interface of molten pool and floating above the interface as a dark bubble; (c) bubble rupture; (d) after bubble rupture, inclusions carried by bubble film aggregate under the surface tension of the film; (e) dispersing inclusions after surface tension disappearing ; (f) inclusions flowed with lateral liquid flowing toward slag or crucible wall, and then adsorbed

表2 FGH4097返回料母合金、粗粉返回料、块料返回料对比结果

Table 2 Comparison of FGH4097 revert master alloy, coarse powder revert and block revert

合金类型	气体含量/10^{-6}		大样电解夹杂物含量						
				夹杂物种类及占比/%			不同夹杂物尺寸占比/%		
	w[O]	w[N]	总含量/[mg·(10 kg)$^{-1}$]	富Al、Si	富Ti	富Ca、Mg	<80 μm	≥80~140 μm	>140~300 μm
粗粉返回料	90	19	–	–	–	–	–	–	–
块状返回料	54	12	4.36	35	45	20	8.3	58.3	33.4
连铸返回料母合金	4	7	1.36	30	60	10	25	50	25

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{1}$$

式中，T为温度，℃；t为时间，s；r为距气泡距离，mm；$\alpha=k/(\rho c)$为热扩散率，m^2/s；ρ为密度，kg/m^3；c为比热容，J/(kg·K)；k为导热系数，W/(m·K)。对于气泡（材料a，$r\leqslant R$，R为气泡半径，mm）与熔体（材料b，$r>R$），分别满足上述方程，并在界面$r=R$处满足温度连续与热流连续条件：

$$T_a(R|t)=T_b(R|t),\ k_a\frac{\partial T_a}{\partial r}\Big|_{r=R}=k_b\frac{\partial T_b}{\partial r}\Big|_{r=R} \tag{2}$$

球心$r=0$处由对称性取$\partial T/\partial r=0$；无穷远$r=r_{max}=10R$处取$T=T_{b0}$。初始条件为$T_a(r|0)=T_{a0}$（$r\leqslant R$），$T_b(r|0)=T_{b0}(r>R)$。

采用显式欧拉格式对时间离散、中心差分对空间离散，得到离散方程：

$$T_i^{n+1}=T_i^n+\alpha\Delta t\left[\frac{T_{i+1}^n-2T_i^n+T_{i-1}^n}{(\Delta r)^2}+\frac{1}{r_i}\frac{T_{i+1}^n-T_{i-1}^n}{\Delta r}\right] \tag{3}$$

计算中空间步长Δr、时间步长Δt需满足CFL稳定性条件$\alpha\Delta t/(\Delta r)^2\leqslant 1/2$。界面$r=R$处采用热流连续条件处理，球心处采用对称边界处理。

用Python编程求解上述离散方程，数值模拟气泡与熔体温度场随时间的变化，并依据温度－黏度关系进一步计算熔体黏度场的变化。图9为气泡进入熔体2 s时气泡与熔体的温度分布，此时气泡内部（虚线扇形圆弧内部）温度从边缘到中心存在较大温度梯度，且仍低于熔体温度，气泡持续吸收熔体热量，导致气泡附近熔体温度产生较大变化；如图9中虚线扇形圆弧外附近区域所示，存在明显温度差，且明显低于整体熔体温度。该区域温度的变化影响了其黏度的变化，气泡附近熔体黏度明显高于整体熔体黏度，该区域熔体黏度的增加，如上述试验所述，进而提高了气泡上浮过程捕获夹杂物的效率。

随着底吹氩持续进行，能够有效实现熔体夹杂物的上浮，从而达到净化熔体的效果；再借助真空水平连铸底铸成型工艺特点，净化后的熔体在连铸水冷结晶器内直接成型，避免了传统模铸浇槽、流槽、冒口等陶瓷的二次污染，能够实现高温合金返回料的高纯熔炼和高洁净制备，实现高温合金新料母合金的高品质制备。

3　结论

依托真空水平连铸装备，以FGH4097高温合金返回料为对象，通过工程实验与热传导数值模拟相结合的方法，系统研究了底吹氩条件下气泡动力学行为及其对夹杂物去除的作用机制，主要结论如下。

1）当熔体温度处于1 550~1 500 ℃时，气泡上浮至熔池顶部后因表面张力不足，难以克服顶部界面张力与熔体重力的共同作用，无法有效携带夹杂物穿越界面；当温度降至1 500 ℃以下时，气泡表面液膜的表面张力及其周围熔体的黏附摩擦力显著增大，能够以稳定形态携带夹杂物突破界面，并在真空环境中破裂后将夹杂物释放至熔池顶部，最终被

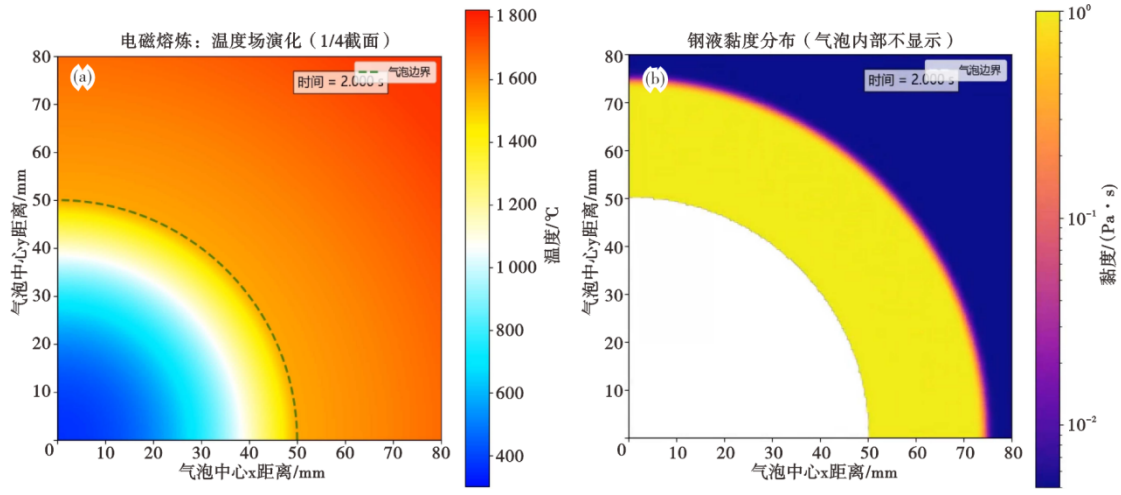


图9　气泡上浮2 s时与熔体之间温度场及黏度变化情况：(a)温度，(b)黏度

Fig. 9　Temperature field and viscosity variation between bubbles and melt at bubble flotation time of 2 s: (a) temperature, (b) viscosity

熔渣或坩埚壁吸附去除。

2)数值模拟表明,气泡进入熔体2 s时,气泡内部温度仍显著低于熔体温度,气泡周围形成厚度约10 mm的热影响区,该区域熔体温度较整体熔体低50~200 ℃,对应黏度升高约1.5~3倍。以直径50 mm气泡为例,其浮力$F_b \approx (1.4 \times 10^{-4})$ N,1 550 ℃时界面张力合力$F_\sigma \approx (1.0 \times 10^{-3})$ N,气泡难以突破界面;1 500 ℃以下热影响区黏度升高使黏附摩擦力增大约2倍,气泡表面液膜表面张力增大,足以克服界面张力与重力合力,实现稳定穿越。

3)基于傅里叶热传导方程,采用有限差分法($\Delta r = 0.1$ mm,$\Delta t = 10^{-4}$ s,满足CFL条件)进行数值求解,定量验证了热影响区的存在及其对黏度场的影响,该定量结果与实验观测到的气泡表面夹杂物黏附现象高度吻合,为气泡携带上浮夹杂物提供了有力的实验与计算依据。

综上揭示了底吹氩条件下气泡与夹杂物相互作用的温度场-黏度场-气泡行为协同机制,明确了有利于夹杂物高效去除的工艺温度,研究结果可为以真空水平连铸为代表的具备底吹工艺的高纯熔炼技术提供底吹氩工艺的吹气参数优化、温度制度设计及工业化推广应用提供理论依据和技术支撑。

参考文献

[1] 刘佳宾, 刘新灵, 李 振. 粉末高温合金夹杂物引起疲劳裂纹萌生微观机理研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(S2): 385-390.

[2] Khiavi F B, Soltanieh M, Abbasi S M. The effect of refining time and calcium addition on the removal of oxygen, nitrogen, and hydrogen from IN713 LC during vacuum induction refining [J]. Vacuum, 2022, 197: 110752.

[3] 袁 超, 郭建亭, 李谷松, 等. 铸造高温合金中氮的影响机理与控制[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(4): 733-746.

[4] Yang S F, Yang S L, Qu J L, et al. Inclusions in wrought superalloys: A review [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(8): 921-937.

[5] 程 娜, 周同金, 刘子男, 等. 镍基高温合金返回料净化利用技术研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(1): 14-23.

[6] 郝志博, 骆合力, 李尚平, 等. JG4246A合金返回料夹杂物分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(8): 1053-1056.

[7] 解方良, 骆合力, 李尚平, 等. DZ125合金返回料夹杂物分析[J]. 铸造技术, 2017, 38(9): 2196-2200.

[8] 郝志博, 骆合力, 李尚平, 等. 真空水平连铸净化处理JG4246A返回料组织与性能[J]. 稀有金属, 2024, 48(11): 1582-1590.

[9] 骆合力, 冯 涤, 李尚平, 等. 真空连铸高洁净K418母合金的组织与性能[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(4): 33-37.

[10] 张志霄, 俞宏晔, 金从进, 等. 精炼钢包底吹氩对流体流动与内衬冲刷行为影响[J]. 特殊钢, 2026, 47(6): 34-39.

[11] 赵晶晶, 程树森, 陶 涛. 钢液中气泡和夹杂物的去除[J]. 北京科技大学学报, 2009(S1): 104-107.

[12] Wang G C, Zhou H C, Tian Q R, et al. Motion of single bubble and interactions between two bubbles in liquid steel[J]. ISIJ International, 2017, 57(5): 805-813.

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

[14] Zhang L F, Aoki J, Thomas B G. Inclusion removal by bubble flotation in a continuous casting mold[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(3): 361-379.

[15] 李知旂, 郝志博, 李尚平, 等. 底吹氩钢包中气泡捕获夹杂物的数值模拟[J]. 特殊钢, DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. N260111.

[16] 巨建涛, 王 睿, 折 媛, 等. 钢包底吹氩去除钢中夹杂物的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2015, 15(1): 68-73.

[17] 顾 樵. 数学物理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[18] 吕云翔. Python基础及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.