钛合金 VAR 过程中自感电磁场对流场与偏析行为的影响

黄立清[1,2], 吴京洋[1], 郭　杰[1], 樊　凯[2*], 李　超[2], 李志宏[2], 李俊杰[1], 王锦程[1]

(1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 陕西 西安 710072; 2. 湖南湘投金天钛业科技股份有限公司, 湖南 常德 415001)

摘　要: 采用合金凝固的连续介质模型, 模拟了钛合金真空自耗电弧熔炼过程中温度场、溶质场、流场、自感电磁场的演化行为。通过对比浮力单独作用、自感电磁力单独作用以及二者共同作用下的熔池流动及成分偏析结果, 揭示了熔炼过程中熔体流动和溶质偏析的形成机理。结果表明, 0.3 kA 小电流熔炼时, 熔池内熔体流动由浮力主导, 形成侧壁向下、中心向上的对流; 0.73 kA 大电流熔炼时, 熔池内呈现由电磁力主导的反向对流, 熔池最大流速为 0.036 m/s; 0.45 kA 中等电流熔炼时, 浮力和电磁力对熔体流动的作用均比较明显, 熔池内形成两个流动方向相反的区域, 且由于两者相互竞争制约, 导致熔池中最大流速达到极低值 0.004 m/s。铸锭整体宏观成分偏析随着熔炼电流的增加呈现先上升后下降再上升的变化规律, 三阶段宏观偏析的极值分别为 0.54%、0.39% 与 0.57%。当电磁力和浮力作用基本相当时, 宏观偏析程度最轻。

关键词: 钛合金; 真空自耗电弧熔炼; 连续介质模型; 自感电磁场; 流场; 宏观偏析

中图分类号: TF823,TG146.2　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2023)04−0055−07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.04.008　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Effect of self-induced magnetic field on liquid flow and segregation during VAR process for titanium alloys

Huang Liqing[1,2], Wu Jingyang[1], Guo Jie[1], Fan Kai[2*], Li Chao[2], Li Zhihong[2], Li Junjie[1], Wang Jincheng[1]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China; 2. Hunan Xiangtou Goldsky Titanium Industry Technology Co., Ltd., Changde 415001, Hunan, China)

Abstract: A continuum model for alloy solidification was used to simulate the temperature evolution, solute distribution, liquid flow, and self-induced magnetic field during VAR process for titanium alloys. The work reveals the influence of self-induced magnetic force and/or buoyancy force on the melt flow and solute segregation by contrastively exerting the forces. When a small melting current of 0.3 kA is used, the melt flow is dominantly driven by the buoyancy force that the melt flows downward at the side of the melt pool and upward in the center of the melt pool. When a large melting current of 0.73 kA is used, the melt flow is dominantly driven by the self-induced magnetic force and the melt flows adversely, and the maximum velocity reaches 0.036 m/s. When a medium current of 0.45 kA is applied, both the two forces act evidently, forming two regions in the pool where the melt flow directions are opposite, and the maximum flow rate in the pool can reach a minimum value of 0.004 m/s due to their

收稿日期: 2023−03−27

基金项目: 博士后国际交流计划项目(YJ20210408)。

作者简介: 黄立清, 1989 年出生, 男, 湖南常德人, 博士, 主要从事钛合金熔炼及塑性加工方面的研究工作, E-mail: liqinghuang2017@163.com;　*通讯作者: 樊凯, 1982 年出生, 男, 陕西富平人, 博士, 正高级工程师, 主要从事钛合金熔炼及塑性加工方面的研究工作, E-mail: fk@xtjtty.com。

competition. With increasing the current, the total segregation of the ingot rises at begin, has a reduction stage after a peak, but then increase continuously again. The extreme values of the three stages are 0.54%, 0.39% and 0.57%, correspondingly. The minimum segregation can be obtained when the self-induced magnetic force and buoyancy force act equally.

Key words: titanium alloy, vacuum arc remelting, continuum model, self-induced magnetic field, liquid flow, macrosegregation

0 引言

真空自耗电弧熔炼(Vacuum Arc Remelting, VAR)广泛应用于钛合金铸锭的制造[1]。在 VAR 熔炼钛合金铸锭的凝固过程中,存在着合金元素偏析。若生产工艺控制不合理,合金元素偏析严重时,可造成后续加工材在不同区域上微观组织的缺陷(如 β 斑),使材料的力学性能严重恶化。近年来随着航空、陆装、船舶工业需求的发展,钛合金的需求急剧增加。这促使了钛合金铸锭逐渐向大规格、多组元、高合金化的方向发展,进而导致铸锭在熔炼凝固过程中的偏析问题日益凸显[2–4]。

针对 VAR 铸锭偏析问题,国内外学者开展了一系列研究。Dobatikin 等[5] 通过系统性测定,发现钛合金铸锭中 Cu、Cr、Fe 等元素呈现出在铸锭中心富集,从中心向外浓度降低,但最外侧成分再次升高的现象。赵永庆和刘军林等[6–7] 进一步分析发现,正偏析元素中 Cu 的偏析程度最大,Fe 元素次之,而 Cr 元素最小。现有研究主要从溶质元素分配系数的角度分析偏析程度。然而凝固偏析除与分配系数有关外,还取决于固/液界面处的溶质浓度,而固/液界面处的溶质浓度主要受熔池中熔体流动的影响。当液相流动时,固/液界面前方溶质富集 (或贫乏) 的液相会流动到其它部位,这一液相流动会改变局部区域的液相浓度,进而改变凝固的固相成分,造成铸锭不同部位的成分差异。

理论上,VAR 过程熔池内液体流动的驱动力主要为浮力与电磁力。其中,浮力与自感电磁力(由熔炼电流产生)均在铸锭纵截面(竖直面)上影响熔体流动,但是两者的作用方向相反[8]。因此,在两种力的竞争下,溶液的流动比较复杂。然而,VAR 高温下液相的流动过程难以直接观测,只能借助于模拟对熔体在熔池中的流动进行研究。

Kondrashov 等[9] 基于热量传输模型,采用有限体积法,在考虑铸锭与熔炼坩埚之间间隙换热的情况下,模拟了 VT3-1 合金凝固过程的熔池形貌,获得了不同电流下、不同直径下熔池轮廓数据。肖聪[10] 利用 Ansys 商用软件,也获得了钛在不同 VAR 熔炼阶段熔池形貌的云图,直观地展现熔池形貌的变化。在进一步考虑熔池中作用力时,樊凯等[11] 通过耦合浮力的连续介质凝固模型,模拟了自然对流条件下的熔池流动及溶质传输行为,分析了浮力对溶质偏析的影响规律。另一方面,Kou 等[12] 同时耦合浮力与电磁力,模拟了不同熔炼电流下 VAR 过程中流场的演化,表明浮力和自感电磁力对熔池的搅拌作用相反,但该工作并未考虑熔池流动模式对溶质分布的影响。

目前,同时耦合温度场、流动场、电磁场及溶质场的 VAR 凝固模拟研究鲜有报道,熔炼过程中浮力与电磁力的竞争行为,及其对宏观偏析之间的影响仍缺乏研究。此外,VAR 模拟中涉及多个复杂的物理场,各研究人员采用的模拟手段众多,这些手段在不同的领域各有专长。Fluent 作为 Ansys 旗下专业流体力学软件,在模拟熔体流动方面具有高的国际声誉,但目前其在 VAR 熔炼凝固模拟方面鲜有应用。因此,在前期基于 Fluent 研究浮力对熔池流动及溶质分布影响[11] 的基础上,笔者进一步在 Fluent 的二次开发程序中引入自感电磁场,研究不同熔炼电流下熔池流动模式,及其对合金元素偏析的影响规律。

1 试验方法

1.1 模型描述

本研究采用连续介质模型来描述钛合金凝固,通过 Fluent 软件二次开发,实现对熔炼过程温度场、流场、溶质场以及电磁场的求解计算,其中温度场、流场、溶质场模型在前期工作[11] 中已详细介绍,在此基础上,笔者将自感电磁场模型写入自定义函数 UDF 中,构建 VAR 过程多物理场耦合计算模型。

VAR 使用直流电源,电流流过熔池时产生自感电磁力 (也称自感洛伦兹力)。自感电磁力的计算包括三个部分:①计算求解电势场,获得计算域内的电流密度;②计算出每个单元的磁通密度;③计算洛伦兹力。暂不考虑搅拌线圈产生的搅拌电磁场和杂磁场的影响。根据欧姆定律得到电流密度 J 与电势

场 φ 的关系:

$$\vec{J} = -\sigma \cdot \nabla\varphi \tag{1}$$

式中, σ 为电导率; ∇表示梯度物理量。

根据安培-麦克斯韦方程, 磁场强度 H 可由电流密度 J 计算得到:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{2}$$

另有, 磁通密度 B 和磁场强度 H 的关系:

$$\vec{B} = \mu_m \vec{H} \tag{3}$$

式中, μ_m 为磁导率。

假设 VAR 几何模型是三维中心轴对称模型, 径向电流分量产生磁通密度 B 相互抵消, 因此最终有效的磁通密度满足下式:

$$B = \frac{\mu}{r}\int_0^R rJ_z dr \tag{4}$$

式中, R 为铸锭半径, r 为网格点距离中心轴的距离, J_z 为轴向电流密度。

洛伦兹力是电荷在磁场中的运动产生, 其计算公式如下:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{5}$$

将上式以源项形式加入连续介质模型的动量方程中, 即可实现自感洛伦兹力与宏观凝固传输过程的耦合。

1.2　计算条件及物性参数

模型的尺寸计算条件与文献 [11] 报道一致, 主要条件为: 直径 50 mm, 最终高度 230 mm, 采用边长 1 mm 的正方形网格, 通过动网格技术实现铸锭生长。以 Ti-5.1%V 合金为例, 分析熔池内流动行为和宏观偏析的形成。合金的物性参数如表 1 所示。

表 1　计算模型采用的物性参数[13]

Table 1　Physical parameters of the computational model

密度 / ($kg\cdot m^{-3}$)	扩散系数 / ($m^2\cdot s^{-1}$)	熔化潜热 / ($J\cdot kg^{-1}$)	V分配系数	液相线斜率 / ($K\cdot\%^{-1}$)	热膨胀系数 / $\%^{-1}$	比热容 / ($J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$)	热导率 / ($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)	流体粘度/ ($kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)	电导率 / ($S\cdot m^{-1}$)	磁导率 / ($H\cdot m^{-1}$)
4 170	4.0×10^{-9}	3.77×10^{5}	0.95	−2.0	−0.35	975	32.7	3.1×10^{-3}	1.0×10^{6}	1.26×10^{-6}

2　试验结果与讨论

2.1　电磁力的分布规律

图 1 给出了 0.45 kA 熔炼电流下的磁通密度 B 与相应的自感洛伦兹力 F 的分布。在任意时刻, 磁场主要集中在靠近铸锭上表面区域, 而铸锭下部磁通密度逐渐降低为零, 铸锭上表面中心位置的磁通密度为零, 而在中心两侧, 随着距中心距离的增大, 磁通密度呈先增大后减小的分布规律。洛伦兹力具有类似的分布规律。在 250 ~ 1 500 s 的过程中, 铸锭上部的磁通密度和洛伦兹力大小及分布基本稳定。图 1 还给出了 250 s 和 850 s 时刻顶部区域洛伦兹力放大图, 并在其中加入熔池的轮廓线。可以看出, 洛伦兹力指向熔池内的中下方。在熔炼初始阶段 (250 s), 熔池较浅, 整个熔池绝大部分区域洛伦兹力均较强, 仅在熔池底部中心存在一个较小的洛伦兹力微弱的区域。熔炼继续进行, 熔池逐渐加深, 熔池下方洛伦兹力微弱的区域逐渐增大, 如 850 s 的放大图所示, 此时洛伦兹力主要分布在熔池的 1/3 以上高度处, 而在其以下洛伦兹力较弱。

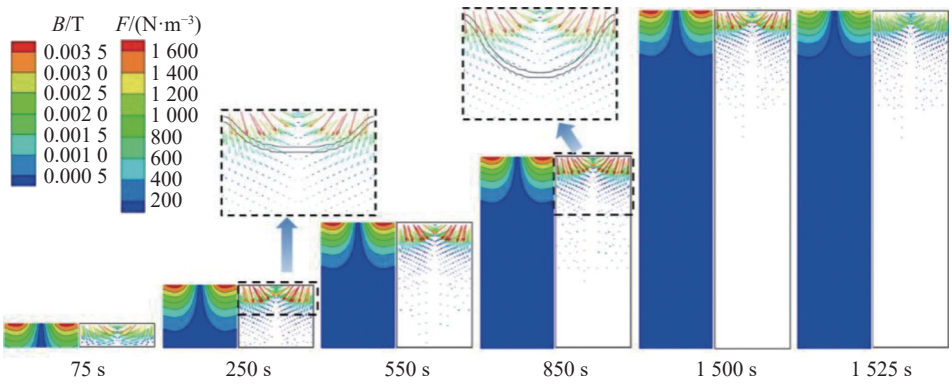

图 1　VAR 过程磁通密度绝对值|*B*|和洛伦兹力 *F* 随时间的演化, 每个时刻中左图为|*B*|分布, 右图为 *F* 分布

Fig. 1　The absolute value of the magnetic flux density (|*B*|, left) and Lorentz force vector (*F*, right) evolution with time during VAR process

上述自感应电磁力分布规律与熔炼电流的分布密切相关，由于熔炼过程中电流主要集中在铸锭顶部，因此自感应磁场也主要集中在靠近铸锭上表面区域，且从自感应磁场计算公式 (4) 中可以看出，自感应磁场与距中心距离 r 之间存在非单调的变化关系，公式右侧的积分项随着半径增大而增大，但公式右侧的系数项随着半径的增大在减小。最终，随着距中心距离的增大，磁通密度呈先增大后减小的分布规律，自感应电磁力也呈现相似的分布规律。

2.2 浮力与电磁力作用下的熔池流动行为

为了更加清晰地揭示浮力和电磁力在熔池流动中的作用机制及二者的相互竞争，分别研究了不同电流下，浮力与电磁力单独作用以及共同作用下的熔池流动行为。图 2 给出不同条件下熔炼铸锭达到最大高度时温度场和流场示意。在 0.3 kA 小电流的情况中(图 2 左侧列)，当只添加浮力时，熔池呈现侧壁向下、中心向上的环流，熔体最大流速 0.004 1 m/s；此时熔池内呈现等温线近似水平分布的热分层现象，这与 Davidson 等[8] 的理论分析结果一致。而在只添加电磁力时，熔池中形成侧壁向上、中心向下的对流，与浮力控制的对流完全相反，熔池深度比浮力对流时加深；熔池内等温线分布也与只添加浮力的情况不同，此时熔池顶部的等温线向熔池下部扩张，在熔池中下区域等温线呈漏斗状，这是由于洛伦兹力作用下高温熔体从熔池顶部沿中心轴线向熔池底部流动，从而提升了中心轴线处熔池中下部的温度，造成等温线在熔池中心处下移，熔池深度加大。当同时添加浮力和自感应电磁力时，结果如最下一排的图所示，此时熔池整体轮廓、流场方向以及温度分布都与仅考虑浮力的结果相似，这表明在小电流情况下，浮力的作用超过自感应电磁力，熔池内的流动主要由浮力控制。

当电流增大至 0.45 kA 时(图 2 中间列)，只添加浮力或只添加电磁力的结果与上述 0.3 kA 电流时相应结果类似，两种作用力单独作用下熔池流动方向、熔池深度、温度场分布均显著不同。当同时考虑两种作用力后，熔池内出现了两个不同方向的环流，熔池最大流速为 0.004 0 m/s。熔池上部(图中蓝色背景区域) 存在一个逆时针环流区域，流动方向与电磁力单独作用时的对流方向相同；而熔池中下部(图中橙色背景区域)存在一个顺时针环流区域，流动方向与浮力单独作用时的对流一致。这是因为随着电流的增加，电磁力增强，且从图 1 电磁力分布分析可知，电磁力主要分布在熔池上表面下方的区域，在距离中心轴线一定距离处最大。因此在熔池上方出现了电磁力控制的逆时针方向环流；而熔池中下部电磁力减弱，因此流动转变为浮力控制的顺时针环流。此外，两种力综合作用下熔池底部顺时针流动的流速要小于浮力单独作用下的流速，这表明电磁力对浮力的流动起到小幅的削弱作用。

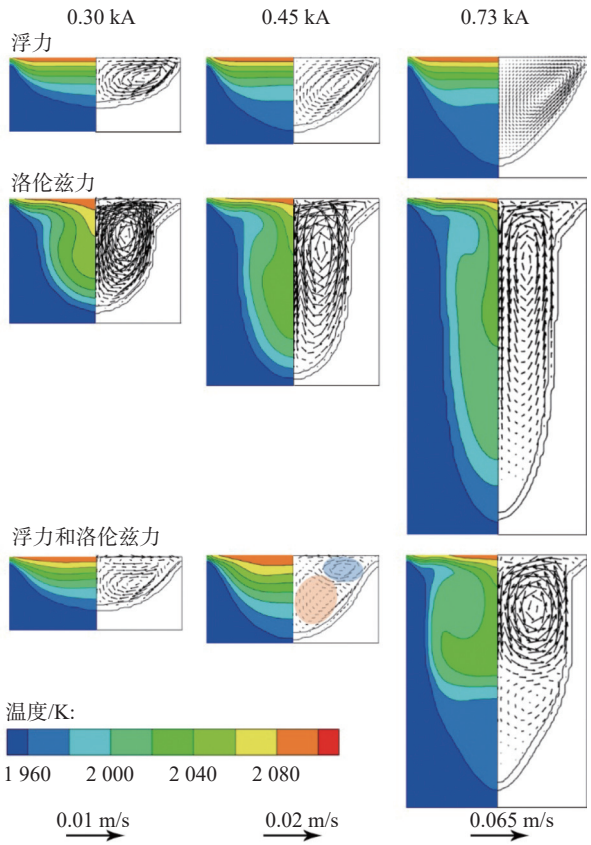

图 2 不同熔炼电流下(从左往右)，浮力与洛伦兹力单独作用及耦合作用下(从上往下)温度场与流场分布，每幅图左半边为温度场、右半边为熔池轮廓和流场

Fig. 2 Temperature distribution and melt flow under different current with buoyancy force and/or Lorentz force

当电流进一步增大至 0.73 kA 时，电磁力进一步增大，相较于 0.45 kA 的结果，熔池中上部电磁力控制的逆时针环流的范围进一步增大，而中下部浮力控制环流的范围相对缩小，熔体的最大流速达到 0.036 4 m/s。熔池中上部的等温线分布形式接近只考虑电磁力的结果，而熔池下部的等温线分布接近只考虑浮力时的热分层现象。此外还发现，0.73 kA 时熔池的深度也比 0.45 kA 时显著增加，且两种作用力综合作用下的熔池深度在单独考虑两种作用力的情况之间。

进一步, 在综合考虑热浮力和自感电磁作用下模拟多种电流的熔炼过程, 不同电流下熔炼达到最大高度时熔池内流场和温度场分布如图 3 所示。可以看出当熔炼电流为 0.11 kA 时, 熔池呈浮力主导的顺时针流动。熔炼电流增大到 0.36 kA 时, 熔池顶部区域出现电磁力主导的逆时针流动, 而熔池底部为浮力主导的顺时针流动, 且此时电磁力较小, 逆时针流动区域较小。随着电流从 0.36 kA 增至 0.58 kA, 熔池顶部电磁力主导的区域不断变大, 同时熔池内流速增加。当熔炼电流达到 0.73 kA 及以上时, 整个熔池中上部呈现电磁力控制的强烈逆时针流动, 而熔池底部为浮力控制的微弱顺时针流动。

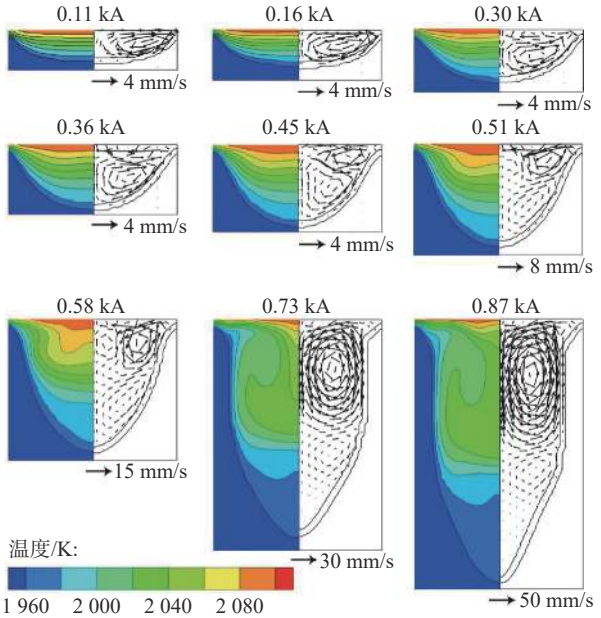

图 3　不同熔炼电流下浮力与电磁力综合作用下熔池内温度场和流场分布

Fig. 3　Distribution of temperature field and flow field driven by buoyancy and Lorentz force with different remelting current

综上, 各种电流下熔池流动形式可总结为三种模式: ①浮力主导模式: 整个熔池内为侧壁向下、中心向上的对流; ②浮力和电磁力共同主导模式: 熔池顶部靠近侧壁处存在一个侧壁向上、中心向下的电磁力控制对流, 而熔池底部靠近中心处存在着反向的对流区域, 且这两个区域均比较明显; ③电磁力主导模式: 熔池内绝大部分为中心向下、侧壁向上的逆时针较强的对流, 仅在熔池底部靠中心存在较弱的浮力控制的对流区域, 此时在熔炼初期熔池较浅或电磁力足够强, 整个熔池内也可能不存在底部的弱浮力流动。随着电流的增加, 熔池内流动会发生从浮力主导模式到浮力和电磁力共同主导模式, 再到电磁力主导模式的转变。

不同对流模式下, 熔池内熔体流速也存在差异。图 4 给出了熔池内液相最大流速随电流的变化情况。从图 4 可以看出, 在 0.45 kA 及之前, 熔池内最大流速很小, 最低值出现在 0.45 kA 附近; 熔炼电流超过 0.45 kA 之后, 最大流速随电流增加而显著增大, 当熔炼电流增大到 0.87 kA 时, 最大流速达到了 0.05 m/s。熔池内最大流速的这一变化规律与对流模式密切相关。电流在 0.3 kA 之前, 熔池内为浮力主导的对流, 这一驱动力相对较弱, 流速较小。电流在 0.3 ~ 0.45 kA 时, 熔池顶部出现电磁力控制的逆时针流动区域, 此时电磁力较弱, 熔池内浮力依旧是主导作用力, 流速极值依旧保持在很小的范围内。当熔炼电流到达 0.45 kA 时, 熔池内浮力和洛伦兹力基本相当, 但由于两者的竞争削弱作用, 熔池内最大流速反而降到最低值。当熔炼电流继续增大时, 电磁力作用加剧, 最大流速显著增加。

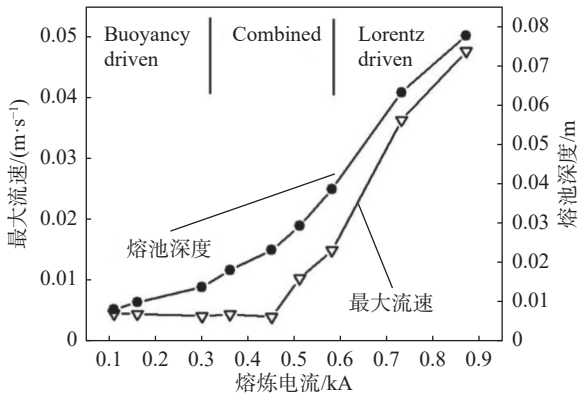

图 4　熔池内最大流速及熔池深度随熔炼电流的变化规律

Fig. 4　The maximum velocity in molten pool and pool depth with different remelting current

此外, 不同流动模式下, 熔池深度随熔炼电流的变化情况也存在差异。熔炼电流增大到 0.45 kA 之前, 熔池深度随电流增长较慢; 而 0.45 kA 之后, 继续增大电流时, 熔池深度增长速率明显加快。这是由于熔池深度增加受到熔炼速率和电磁力控制流动两方面的影响。熔炼电流增加时, 自耗电极的熔化速率提高, 单位时间进入熔池的过热熔体增多, 导致热量在熔池内的积累增大, 因而熔池深度增大, 这是电流增大到 0.45 kA 之前导致熔池加深的主要原因。当电流超过 0.45 kA 时, 电磁力控制的对流开始加强, 除上述熔速增大导致的热量输入增大外, 由于电磁力控制的对流开始占主导地位, 而这一对流会将

熔池顶部的过热熔体沿铸锭中轴线直接运送到熔池底部，从而进一步增大了熔池深度，因此熔池深度随电流的增长速率明显加快。

2.3 流动模式对溶质偏析的影响

图 5 给出了 0.45 kA 电流下，熔炼过程中溶质分布随时间的演化结果，其中铸锭右侧给出了熔池轮廓和流场分布。初始 75 s 内整个熔池均为电磁力控制的中心向下、侧壁向上的对流，此对流将熔池底部固/液界面前沿凝固排出的溶质沿侧壁向上带到熔池内部，造成底部固/液界面处的溶质贫乏，从而在铸锭底部中心两侧形成了明显的负偏析区域(75 s 结果底部蓝色区域)。除了熔炼最初阶段(75 s)以外，绝大部分熔炼过程中熔池内呈现浮力和电磁力共同作用下的流动模式(如图中放大图所示)。随着熔炼进行到 350 s，熔池深度加大，浮力作用显现，且与电磁力作用相当，整个熔池流动较弱，此时整体偏析较弱。当熔炼进行到 650 s 时，整个中下部熔池形成了较大范围的浮力控制对流，此对流沿侧壁向下把溶质带到熔池底部，在底部形成正偏析。同时浮力控制对流上方为电磁力控制的沿侧壁向上的对流，它把侧壁溶质带入熔池上方。熔池侧壁向上与向下流动的分界区域，溶质最为贫乏，形成了负偏析带(图中浅蓝色带状区域)。在随后的熔炼过程中 (950 ~ 1 500 s)，偏析状态保持。最后保温阶段(>1 500 s)，熔池内高浓度残余液相转变为固相。

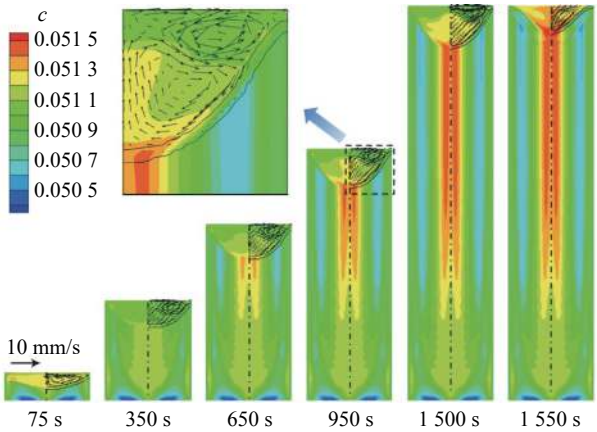

图 5 0.45 kA 电流熔炼过程中溶质分布随时间演化，每幅图右侧为耦合流场及熔池轮廓

Fig. 5 The concentration evolution with time during the 0.45 kA current remelting process, coupled flow field and pool's profile on the right side of each picture

浮力主导或电磁力主导对流下的偏析形成过程与上述共同主导对流下的偏析形成的过程较为类似。浮力主导阶段的流场作用下，电磁力形成的流场区域被压缩，在熔池侧壁上、下对流分界线附近形成负偏析带向铸锭表面移动；而电磁力主导情况下，该分界线更靠近熔池底部，导致负偏析带向铸锭中心移动。图 6 给出浮力(0.3 kA)和电磁力(0.73 kA)主导对流下熔炼达到最大高度时刻的溶质场与流场。

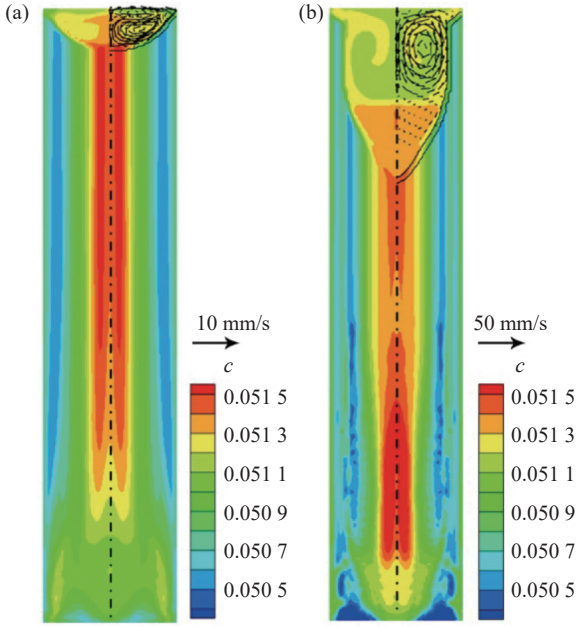

图 6 0.3 kA (a) 与 0.73 kA (b) 下熔炼到达最大高度时的流场与偏析

Fig. 6 Solute distribution and melt flow when the ingot reaches a maximum height using 0.3 kA(a) and 0.73 kA(b)

为更直接的反映铸锭整体偏析程度，定义整体宏观偏析指数 (Global Macrosegregation Index, GMI) 如下：

$$\mathrm{GMI} = \sum_{i=1}^{n} \left| \frac{c_i - c_0}{c_0} \right| / n \tag{6}$$

其中，n 为铸锭模型划分中的总单元数，个；c_i为每个单元的浓度，%；c_0为体系平均浓度，%。GMI 值为 0 代表整个铸锭完全无偏析，GMI 值越大代表整体偏析越重。

GMI 随电流变化统计结果如图 7 所示。在浮力主导的小电流区间，随着电流增大，GMI 出现了先增大后减小的变化趋势，其原因在于：一方面，随着电流增大，熔池侧壁熔体向下的流动速度加大，从而将更多的溶质由侧壁上方带入熔池底部，偏析加重；另一方面，随着电流的增大，熔速增加，熔池深度加大，在熔池底部等温区范围加大，此区域流动微弱，侧壁向下的熔体大部分在到达底部等温区前已转向熔池中部流动，因而底部溶质富集程度降低，中心正

偏析程度减弱。当电流进一步增大时, 进入电磁力和浮力共同主导的流动模式, GMI 呈现先减小后增大的结果, 在 0.45 kA 时达到最小值, 此时电磁力与浮力作用最为接近, 两者竞争而削弱流场流速(图 4), 熔池底部浮力对流最弱, 偏析最轻。此后电磁力作用开始凸显, 铸锭整体流动加强, 偏析加重。进一步增大电流, 进入电磁力主导对流的模式, GMI 随电流的增加而增大。

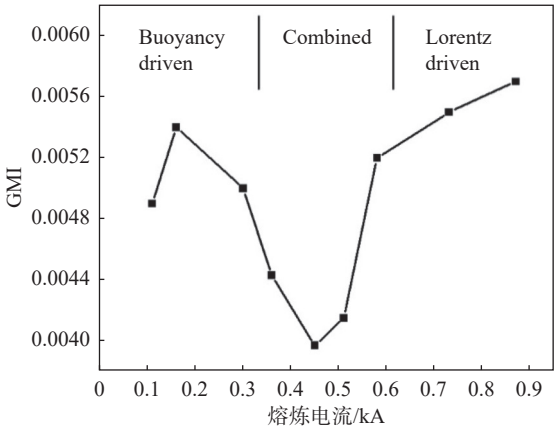

图 7　铸锭整体宏观偏析数随熔炼电流的变化
Fig. 7　GMI under different remelting current

上述结果表明宏观偏析程度随电流呈现出非单调的变化关系, 偏析程度并非总是随着熔炼电流的增大而增加。在电流增大到浮力与电磁力作用相当(GMI 谷底位置)之前, 存在电流增大反而偏析减轻的情形, 这与姚锦声[14]、薛祥义等[15] 报道的试验研究结果相吻合。熔体流速的增加, 带来更快速的溶质交换, 负偏析带的移动证实了流场对溶质偏析的影响。然而, 影响宏观偏析除了流场带来的溶质交换, 还存在着流场带来的热量对温度场进而对凝固偏析的影响。因此, 后续计划继续在流场对溶质偏析的全面及量化影响上开展更深入的工作。

3　结论

1)VAR 熔炼过程中的自感磁场主要集中在铸锭的上表面附近区域, 磁通密度及洛伦兹力从铸锭中心到边部呈现先增大后减小的分布规律。

2)浮力和电磁力对流体的驱动方向相反, 随着电流的增加, 电磁力的作用逐渐显现并最终成为熔池流动的主导驱动力, 电流增加到 0.73 kA 时, 流场最大流速达到 0.036 m/s。在 0.45 kA 中等电流情况下, 电磁力与浮力相互竞争, 形成两个方向相反的流动区域, 并且导致熔池中最大流速达到极低值 0.004 m/s。

3)铸锭整体宏观偏析随着熔炼电流的增加呈现先上升, 再下降, 最后上升的规律, 三阶段 GMI 极值分别为 0.54%、0.39% 与 0.57%。在电磁力和浮力共同主导的区间内, 当两种力作用基本相当时, 宏观偏析程度最轻。

参考文献

[1] Li Xiong, Pang Kechang, Guo Hua, *et al*. Melting technology of wrought Ti and Ti alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(S1): 906−913.
(李雄, 庞克昌, 郭华, 等. 变形钛及钛合金熔炼技术[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 906−913.)

[2] Hayakawa H, Fukada N, Udagawa T, *et al*. Solidification structure and segregation in cast ingots of titanium alloy produced by vacuum arc consumable electrode method[J]. ISIJ International, 1991, 31(8): 775−784.

[3] Mitchell A, Kawakami A, Cockcroft S L. Beta fleck and segregation in titanium alloy ingots[J]. High Temperature Materials Processes (London), 2006, 25(5-6): 337-349.

[4] Liu Yingying, Chen Ziyong, Jin Tounan, *et al*. Present situation and prospect of 600 ℃ high-temperature titanium alloys[J]. Materials Reports, 2018, 32(11): 1863−1869, 1883.
(刘莹莹, 陈子勇, 金头男, 等. 600 ℃高温钛合金发展现状与展望[J]. 材料导报, 2018, 32(11): 1863−1869, 1883.)

[5] Dobatkin V I, Anoshkin N F. Comparison of macrosegregation in titanium and aluminium alloy ingots[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 263(2): 224−229.

[6] Zhao Yongqing, Liu Junlin, Zhou Lian. Analysis on the segregation of typical β alloying elements of Cu, Fe and Cr in Ti alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(4): 531−538.
(赵永庆, 刘军林, 周廉. 典型β型钛合金元素Cu, Fe和Cr的偏析规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(4): 531−538.)

(下转第 84 页)