

SP700 钛合金铸锭中 Fe 含量控制

张开发<sup>1,2</sup> 负鹏飞<sup>1,2,3</sup> 李佳佳<sup>1,2</sup> 刘 华<sup>1,2</sup> 弋 可<sup>1,2</sup> 王超南<sup>1,2</sup> 李 维<sup>1,2</sup>

(1.西部钛业有限责任公司; 2.钛合金加工技术国家地方联合工程研究中心; 3.西安交通大学材料科学与工程学院)

**摘 要** 对比了两种工艺路线下真空自耗电弧熔炼 SP700 铸锭中的 Fe 元素分布和宏观组织,发现 Fe 在钛合金中呈现明显的正偏析,铸锭冒口心部 Fe 含量为 2.38%,其截面极差为 0.58%,锭底心部为 1.90%,其截面极差为 0.23%,Fe 含量沿着凝固方向增加,易在铸锭心部和头部富集。通过对工艺路线进行调整,选用合适的中间合金和布料方式,提高了 Fe 在电极块中的均匀性,同时采用强冷却、低电流、大搅拌和长补缩的熔炼参数有效地抑制了 Fe 的结晶偏析。改进后铸锭成分分布更加均匀,冒口心部 Fe 含量为 2.03%,其截面极差为 0.21%,且晶粒尺寸细化、组织更加均匀,Fe 在等轴晶区内的偏析减弱。

**关键词** SP700 铸锭;真空自耗电弧熔炼;Fe 元素;偏析;凝固组织

**中图分类号** TF823;TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.09.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Control of Fe Content in SP700 Titanium Alloy Ingot

Zhang Kaifa<sup>1,2</sup>, Yun Pengfei<sup>1,2,3</sup>, Li Jiajia<sup>1,2</sup>, Liu Hua<sup>1,2</sup>, Yi Ke<sup>1,2</sup>, Wang Chaonan<sup>1,2</sup>, Li Wei<sup>1,2</sup>

(1.Western Titanium Technologies Co., Ltd.; 2.National and Local Joint Engineering Research Center for Titanium Alloy Processing Technology; 3.School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University)

**Abstract:** Fe distribution and macrostructure of SP700 ingot melted by vacuum arc remelting under different processes were analyzed comparatively. The results indicate that Fe in the titanium alloy presents an obvious positive segregation trend. Fe content in the core of the ingot riser is 2.38%, and cross-section range is 0.58%, while that in the core of the ingot bottom is 1.90%, and the cross-section range is 0.23%. Fe content is increased along the solidification direction and aggregate in the core and head of the ingot. The uniformity of Fe element in the electrode block is improved by adjusting the process route and selecting the appropriate intermediate alloy and distribution method. Meanwhile, Fe segregation is effectively inhibited by taking melting parameters such as strong cooling boundary, 1 000 melting current, strong stirring intensity, and long feeding time. After optimization, the composition distribution of the ingot is more uniform, and Fe content in the center of the riser is 2.03% with cross-section range of 0.21%. The grain size is reduced with homogeneous structure, and Fe segregation in the equiaxed crystal region is weakened.

**Key Words:** SP700 Ingot, Vacuum Arc Remelting, Fe Element, Segregation, Solidified Structure

收稿日期:2023-03-26;修改稿收到日期:2023-05-09

第一作者简介:张开发,男,1995 年出生,助理工程师,西安(710201),E-mail:1480660696@qq.com

通信作者:负鹏飞,男,1985 年出生,高级工程师,西安(710201),E-mail:yunpengfei@126.com

引用格式:张开发,负鹏飞,李佳佳,等. SP700 钛合金铸锭中 Fe 含量控制[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(9):1 291-1 296.

ZHANG K F, YUN P F, LI J J, et al. Control of Fe content in SP700 titanium alloy ingot[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(9):1 291-1 296.

[2] 商宏飞,张友寿,夏露,等.型砂磷酸盐粘结剂用氧化镁固化剂的研究[J].特种铸造及有色合金,2010,30(2):96,165-166.

[3] 喻双喜,张友寿,夏露,等.磷酸盐无机铸造粘结剂改性及其热固化砂研究[J].特种铸造及有色合金,2020,40(10):1 067-1 071.

[4] 蔡鹏.磷酸盐无机覆膜砂研究[D].武汉:湖北工业大学,2020.

[5] 唐文卓,张友寿,夏露.辅料对磷酸盐粘结剂覆膜砂性能的影响[J].铸造,2021,70(6):712-716.

[6] 夏增权,张友寿,夏露,等.无机磷酸盐干态覆膜砂用粘结剂的改性研究[J].铸造,2022,71(9):1 111-1 115.

[7] 李北,周勇,许贵珍,等.一种柠檬酸镁晶体及其生产方法.中国:CN106854145A[P].2017-06-16.

[8] 夏露,黄晋,张友寿,等.铝磷酸盐热硬砂抗吸湿机理探讨[J].铸造,2011,60(2):188-191.

[9] 陈宁,高祀建,霍冀川,等.不同固化剂对磷酸铬铝固化行为的影响[J].硅酸盐通报,2014,33(6):1 347-1 353.

[10] 陈智鹏.几种过渡金属磷酸盐功能材料的合成及其热分解动力学研究[D].南宁:广西大学,2013.

[11] 黄霞.镁磷酸盐发射性能调控及其用于日间辐射制冷研究[D].广州:华南理工大学,2020.

[12] 李娜.铝磷酸盐新型辐射制冷材料的制备、结构与性能[D].广州:华南理工大学,2019.

(编辑:彭瑾)

SP700(TC24)合金是在 TC4 合金的基础上添加 Mo 和 Fe 元素制备的超塑性钛合金,其名义成分为 Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe<sup>[1-3]</sup>,相较于 TC4 合金其具有更高的强度和塑性、更好的冷热加工性。由于添加了  $\beta$  相同晶型元素 Mo 和共析型元素 Fe,其超塑成形温度比 TC4 合金降低了约 100 °C<sup>[4-6]</sup>,同时由于降低了 Al 含量,其抗疲劳寿命和耐腐蚀性均得到提高<sup>[7-8]</sup>,因此得到广泛关注,成为航空航天、航海运输、石油化工等领域的热门候选材料<sup>[9-10]</sup>。

由于钛合金具有较高的熔点,化学活性高,特别是对 C、H、O、N 等间隙元素的亲和力大,且材料纯度对加工及适用性能的影响极其敏感,故钛合金的主流生产方法为真空自耗电弧熔炼(VAR),工作原理为:在真空环境中,自耗电电极在低电压、高电流的直流电弧高温作用下熔化并滴入坩埚,坩埚中的熔池自下而上连续凝固为铸锭。由于真空自耗电弧熔炼工艺的封闭性和边熔炼边凝固的特点,其生产出的钛合金铸锭可能会存在难熔金属和非金属夹杂、心部缩松(裂纹、缩孔)、表面冷隔(气孔、砂眼)、化学成分偏析等。作为富  $\beta$  相的  $\alpha+\beta$  双相钛合金,SP700 合金熔炼过程中控制 Fe 元素的均匀性是难点<sup>[11-12]</sup>。本研究基于钛合金铸锭生产过程,从多角度进行了技术改进,探索出了真空自耗电弧熔炼 SP700 铸锭的工艺路线,旨在为 SP700 合金推广及应用提供参考。

1 试验材料及方法

采用两种工艺制备铸锭合金,通过对比两种工艺下钛合金铸锭成分分布和晶粒尺寸,确定 SP700 铸锭最优工艺路线。

1.1 工艺 A

工艺 A 原材料选用质量分数>99.7%的小粒度海绵 Ti、Al-V 合金、Al-Mo 合金、Ti-Fe 合金、Al 豆及 TiO<sub>2</sub>,进行 3 次真空自耗电弧熔炼,工艺路线见图 1,原材料经过自动称量混布料系统,按照配料值称量倒入压机型腔,经油压机压制为电极块。电极块采用真空等离子焊箱组焊为两支自耗电电极,先熔炼两个一次锭,在真空自耗电弧炉中掉头对焊熔炼为一个二次锭,二次锭再

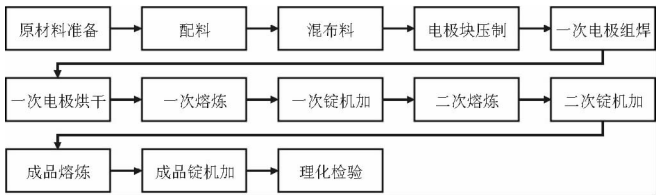


图 1 SP700 铸锭熔炼工艺路线

Fig.1 Melting process route of SP700 ingot

掉头熔炼成直径为  $\phi 640$  mm 的成品锭,记为铸锭 A。

1.2 工艺 B

工艺 B 路线、锭型、投料量和配料值与工艺 A 相同,原材料选用小粒度海绵 Ti、Al-V 合金、Al-Mo 合金、Al-V-Fe 合金、Ti-Fe 合金、Al 豆及 TiO<sub>2</sub>,电极块压制方式由单称称量、一次压制改为分层布料,制备的铸锭记为铸锭 B。成品熔炼参数进行如下改进:①冷却水出水温度降低 5 °C;②成品熔炼电流降低 5 kA;③稳弧电流降低 5 A,稳弧搅拌换向周期增加 10 s;④增加补缩质量,适当延长补缩时间。

2 试验结果与讨论

为减少起弧阶段参数波动对铸锭品质的影响,两支铸锭均切除固定长度锭底。铸锭头部采用超声波探伤手段确定冒口长度,铸锭 A 的冒口切除量约为 120 mm,铸锭 B 的冒口切除量约为 110 mm。

2.1 铸锭圆周成分

沿铸锭圆周取样共 5 处,取样位置见图 2。取样方式为车床绕铸锭圆周车屑。图 3 为铸锭圆周 Fe 含量分布。可以看出,铸锭 A 圆周 Fe 含量平均为 1.834%,极差为 0.07%,铸锭 B 圆周 Fe 含量平均值为 1.830%,极差为 0.03%,两个铸锭圆周成分均匀,均符合 GB/T 3620.1 中 Fe 含量为 1.7%~2.3%要求。根据经典结晶偏析理论<sup>[13]</sup>:

$$C = kC_0(1 - \xi)^{k-1} \tag{1}$$

式中,C 为结晶瞬时溶质组元浓度; $C_0$ 为溶质初始配比浓度; $\xi$ 为已结晶部分体积分数; $k$ 为溶质分配系数。

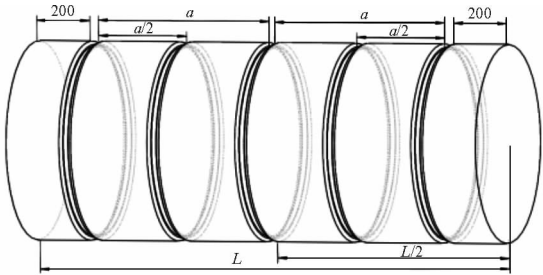


图 2 铸锭圆周取样图

Fig.2 Circumferential sampling diagram of ingot

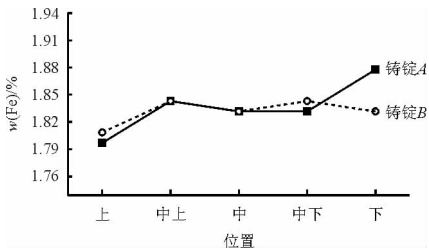


图 3 铸锭圆周 Fe 元素分布

Fig.3 Circumferential Fe distribution of ingot

溶质分配系数  $k$  决定了结晶偏析程度大小,当  $k < 1$  时元素表现为正偏析,而当  $k > 1$  时元素则表现为负偏析, $k$  值越偏离 1,元素偏析程度越大。Fe 元素在钛合金中的平衡分配系数为 0.3<sup>[14-15]</sup>,表明其有很大的正偏析趋势。然而实际熔炼过程中溶质分配系数并不是常数,其与过冷度、熔池温度、熔池形貌、熔池深度及合金元素含量等有关。熔炼过程中沿铸锭径向,熔池首先与坩埚壁接触通过热传导的方式传热,冷却强度很大,铸锭圆周表层快速凝固,形成细小等轴激冷层。坩埚冷却强度随着向熔池心部传递而减弱,凝固过程中铸锭直径收缩,表层与坩埚壁形成空隙,热传递方式转化为辐射传热。由于铸锭表层的热传递效率高,该区域凝固过程快速通过固、液两相区,Fe 元素的结晶偏析未能进行,故两个铸锭圆周表面 Fe 含量分布均匀。

2.2 铸锭横截面成分

铸锭横截面取样共 13 点,位置见图 4,取样方式为钻床钻屑。图 5 为铸锭 A 横截面 Fe 元素分布。可以看出,铸锭上部沿直径方向 Fe 含量由心部到边部逐渐

降低,锭底 Fe 含量分布规律不明显。冒口截面 Fe 含量极差为 0.58%,冒口下部 100 mm 处截面极差为 0.45%,锭底截面极差为 0.23%,说明随着铸锭由下向上顺序凝固过程中,横截面上 Fe 元素的偏析趋势逐渐加强,心部与边部的 Fe 含量差值逐渐增大。这主要是由于随着真空自耗电弧熔炼的进行,熔池形貌和深度时刻都在发生变化,凝固前沿固液两相区的宽度和形状也随之变化,在凝固界面处固相中的 Fe 原子会不断向液相中析出,导致液相一侧 Fe 元素富集。

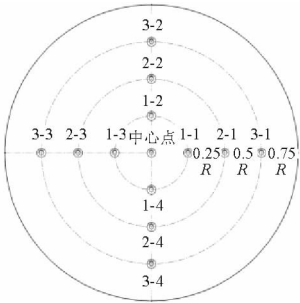


图 4 铸锭横截面取样图

Fig.4 Cross-section sampling diagram of ingot

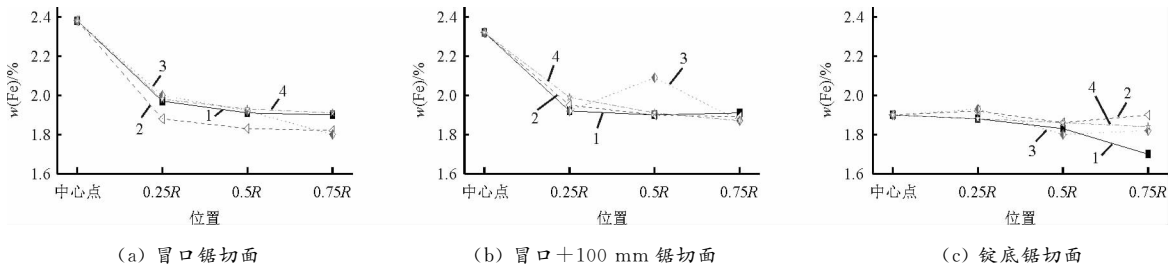


图 5 铸锭 A 横截面 Fe 元素分布  
Fig.5 Fe distribution of cross section of ingot A

图 6 为真空自耗电弧熔炼过程。可以看出,真空自耗电弧熔炼可分为 4 个阶段:①起弧建立熔池阶段,见图 6a,起弧后熔滴直接与坩埚底部接触,冷却作用很强,造成熔滴极大过冷,熔滴来不及向四周散开就迅速凝固。当熔滴堆积到一定高度后坩埚底部的冷却强度减弱,熔滴可以向四周流散逐渐形成熔池,该区域主要由无序等轴晶组成,合金元素来不及扩散,其均匀性取决于电极分布,故锭底 Fe 分布较为均匀,心部含量为 1.90%,截面均值为 1.86%;②稳定熔炼阶段,见图 6b,凝固过程中晶体沿固相周边法线方向生长,沿着熔池轮廓线指向电弧区。由于沿铸锭不同高度上冷却强度逐渐变化,柱状晶的取向也各不相同,当坩埚壁的冷却强度远大于底部时,柱状晶近似水平生长,反之则近似于垂直生长,稳定熔炼过程介于两者之间呈抛物线状生长。随着熔炼的进行结晶速度降低,熔池逐渐加深,由扁平状转化为圆锥状,且锥度逐渐增大,结晶偏析倾向增加,Fe 元素在铸锭横截面呈现向中心富集的趋势。

故冒口下部 100 mm 处心部 Fe 含量为 2.32%,超出标准上限,而距心部 0.75R 处均值为 1.88%;③冒口补缩阶段,见图 6c,在熔炼末期随着熔炼电流不断减小,熔速不断降低,输入熔池的热量减少,熔池逐渐抬高,结

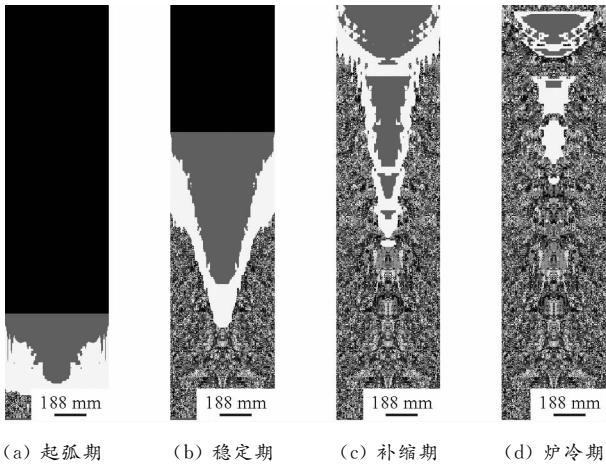


图 6 真空自耗电弧熔炼过程

Fig.6 Process of vacuum arc remelting

晶速度加快;④断弧冷却阶段,见图 6d,断弧后熔池上部的热源转化为冷源,熔池上表面受辐射传热影响快速冷却,其枝晶呈现由上向下垂直生长,剩余熔池处于三维散热状态,随着熔池内部热对流减弱和杂质增多,熔池内部同时结晶。当铸锭与坩埚壁形成空隙后,散热条件转化为辐射传热,表层晶层停止生长,铸锭心部由等轴晶组成。

图 7 为铸锭 A 冒口纵剖低倍组织,在铸锭头部枝晶呈现由上向下的生长方向,铸锭圆周受水冷坩埚壁和锥形熔池的传热影响,呈现由边部向心部的斜上生长,缩孔附近冷却较为均匀,呈现为细小等轴晶。对铸锭 A 冒口(1~10 点)及其下部 100 mm(11~20 点)长锭块中轴线取样检测 Fe 含量,结果见图 8,按正偏析规律缩孔上部熔池由上向下结晶,Fe 含量应逐渐增大,但铸锭头部冷却强度大、结晶速度快,Fe 来不及偏析,故缩孔上部柱状晶区 Fe 含量分布均匀,均值为 1.96%,极差为 0.02%。在缩孔下部中轴线上,结晶始终是由下向上,因此 Fe 从下向上富集在缩孔下部(最终凝固区)出现最大值为 2.78%,严重偏离标准要求上限。根据不同截面上 Fe 含量检测结果,表明其符合正偏析规律,分布线与熔池凝固界面基体吻合,与铸锭凝固过程相适应。

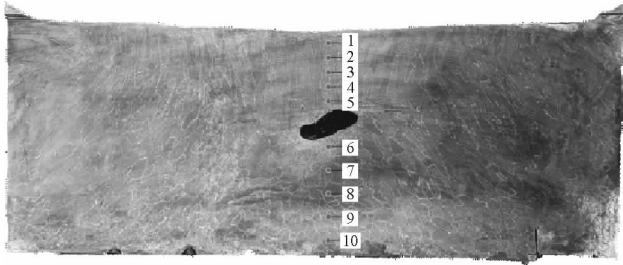


图 7 铸锭 A 冒口中轴线取样图

Fig.7 Sampling diagram of ingot A riser in central axis

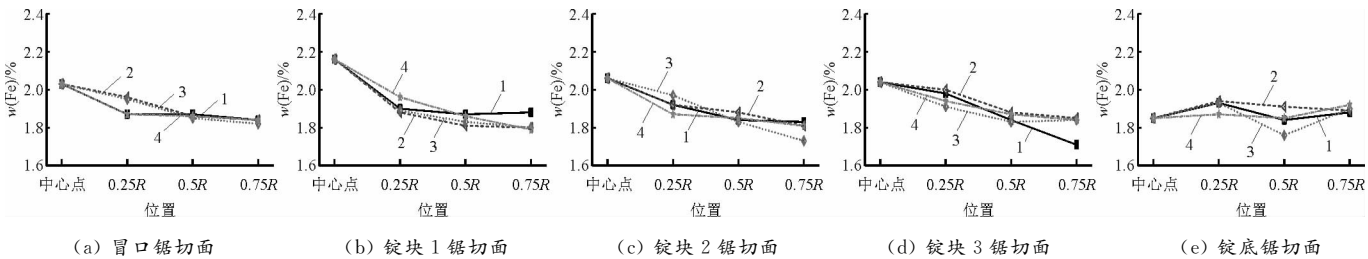


图 9 铸锭 B 横截面 Fe 元素分布

Fig.9 Fe distribution of cross section of ingot B

倍组织见图 10。可以看出,铸锭 B 边部、0.5R 处、心部晶粒尺寸分别为 4~7、4~10、3~7 mm,铸锭 A 边部、0.5R 处、心部晶粒尺寸分别为 4~15、10~30、3~20 mm,铸锭 B 的晶粒尺寸明显小于铸锭 A 且组织更加均匀。Fe 元素在柱状晶内偏析程度很小,在等轴晶

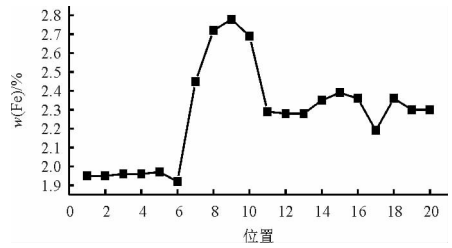


图 8 铸锭 A 冒口中轴线 Fe 含量分布

Fig.8 Fe content distribution of ingot A riser in central axis

铸锭 B 首先切除冒口和锭底再进行 4 等分锯切,共产生 5 个锯切面,从上到下依次为:冒口锯切面、锭块 1 锯切面(a 面)、锭块 2 锯切面(b 面)、锭块 3 锯切面(c 面)和锭底锯切面。对 5 个锯切面按图 4 分别进行 13 点取样检测 Fe 含量,检测结果见图 9。沿直径方向 Fe 含量的分布规律与铸锭 A 相同,由心部到边部 Fe 含量逐渐降低,锭底 Fe 含量分布规律不明显。真空自耗电弧熔炼过程中,结晶沿固相周边法线方向生长,沿着熔池轮廓线指向电弧区,a 面距心部 0.25 R 处 Fe 含量均值为 1.91%,b 面距心部 0.5 R 处 Fe 含量均值为 1.85%,c 面距心部 0.75 R 处 Fe 含量均值为 1.81%,说明在铸锭纵向 Fe 含量沿边部指向冒口缩孔斜向上逐渐递增,偏析方向与凝固方向基本吻合。冒口心部 Fe 含量为 2.03%,极差为 0.21%,较铸锭 A 分别减少了 0.35%和 0.37%,3 个锭块横截面 Fe 含量的极大值依次为 2.16%、2.06%、2.04%,极小值依次为 1.79%、1.73%、1.71%。锭底锯切面 Fe 含量极大值为 1.94%,极差为 0.18%,较铸锭 A 极差减少 0.05%。铸锭 B 最大截面极差为 0.37%,5 个面平均极差为 0.284%,铸锭 A 最大截面极差为 0.58%,3 个面平均极差为 0.42%,改进后的工艺对 Fe 偏析抑制效果明显,所有取样点检测结果均满足标准要求。

对铸锭 A 和铸锭 B 的冒口锯切面进行酸洗,其低

内会发生明显的偏析,沿着等轴晶生长方向 Fe 含量增加,等轴晶的尺寸越大,Fe 偏析明显<sup>[16]</sup>,因此改进后的工艺可以抑制 Fe 在等轴晶区内的偏析。

铸锭 B 工艺抑制钛合金中 Fe 元素的偏析,主要原因有:

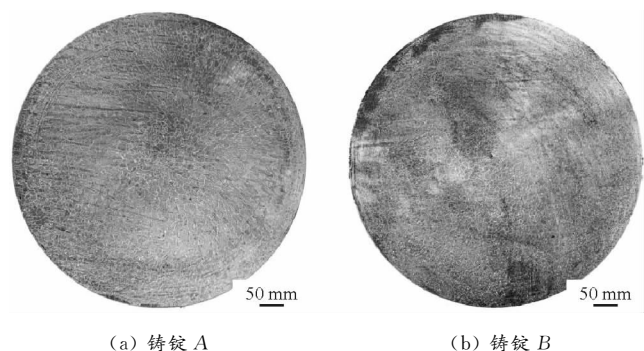


图 10 铸锭冒口锯切面低倍组织

Fig.10 Macrostructure of sawn plane of ingot riser

(1)选择合适的中间合金和布料方式 Al-V-Fe 合金的熔点为 1 617 ℃、Al-Fe 合金的熔点为 1 160 ℃,相较于 Ti-Fe 合金的熔点(1 085 ℃)更接近于钛的熔点(1 668 ℃),一次熔炼时易于与海绵 Ti 同时形成液滴落入熔池。海绵 Ti 的粒度为 3~12.7 mm, Al-V-Fe 合金为 1~3 mm, Al-Fe 合金为 3~6 mm, Ti-Fe 合金为 3~8 mm,根据斯托克斯沉降公式:

$$u = gd^2(\rho_s - \rho)/(18\mu) \quad (2)$$

式中,  $u$  为颗粒沉降速度;  $g$  为重力加速度;  $d$  为颗粒直径;  $\rho_s$  为颗粒密度;  $\rho$  为液体密度;  $\mu$  为粘滞系数。颗粒在熔池中的沉降速度与粒度平方成正比。钛铁合金粒度较大,发生掉块时下沉速度就愈大,一次熔炼时掉块偏析的风险愈高。此外,选用 Al-V-Fe 合金与 Al-Fe 合金组合添加 Fe 元素,其合金添加量较 Ti-Fe 合金可提升约 15.7%,可以缓解 Fe 元素在电极块中的偏聚。

受重力和搅拌摩擦力作用,混布料过程中小粒度中间合金可能会在型腔底部富集,造成电极块成分分布不均,见图 11。舍弃常规单秤称量、一次压制的方式,选用分层布料,使得电极块中的原材料分布更加均匀。

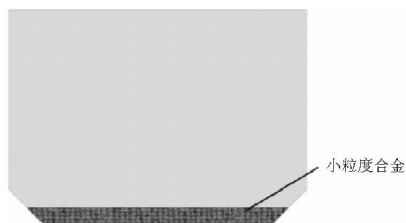


图 11 电极块布料方式优化

Fig.11 Optimization of electrode block distribution method

(2)增大冷却强度 冷却水在真空自耗过程中的主要作用为:①吸收电弧区的热量,防止设备及坩埚熔化;②为熔融态合金凝固提供过冷。冷却水出水温度降低 5 ℃后,凝固前沿的过冷度和温度梯度增大,冷却速度加快,固液两相区的凝固时间缩短。根据 Aziz 凝固动力学模型<sup>[17]</sup>,界面非平衡溶质分配系数  $k_1$  与凝固速度  $v$  的关系为:

$$k_1 = \frac{k_0 + Rv/D_i}{1 + Rv/D_i} \quad (3)$$

式中,  $k_0$  为平衡溶质分配系数;  $R$  为固液界面上成分调整的原子间距离尺度;  $D_i$  为溶质原子穿过固液界面的扩散系数,随着凝固速度加快,溶质分配系数趋近于 1,结晶偏析得到抑制,故铸锭 B 横截面 Fe 含量极差减小。

(3)减小熔炼电流 真空自耗电弧熔炼过程中熔炼电流是对铸锭品质影响最大的参数,实践证明,稳定熔炼阶段熔炼电流与熔化速度基本呈线性关系。随着熔炼电流增大,输入电弧区的功率增加,熔池表面温度升高,电极的熔化速度随之增加。研究表明,熔化速度对熔池形貌影响显著,随着熔化速度增大,熔池相应地变宽变深<sup>[18]</sup>。故为了抑制 Fe 元素偏析,铸锭 B 采用小电流、低熔速的工艺方案,将熔炼电流降低 5 kA,使熔池形貌由锥形转变为扁平形,减小固、液两相区的尺寸,细化凝固组织。此外,在熔炼过程中保持相对较低的熔化速度,单位时间内进入熔池的熔滴数量较少,也可使电磁搅拌更加充分<sup>[19]</sup>。

(4)增大搅拌强度 真空自耗电弧炉中的稳弧线圈有两个作用:①稳定熔炼电弧,避免电弧逸散击穿坩埚;②搅拌熔池,一方面使合金组元均匀化,另一方面使杂质气体元素扩散溢出。稳弧磁场主要由两个参数进行控制——稳弧电流和稳弧换向周期,从熔炼过程观察发现,熔池搅拌强度受换向周期调整的影响大于稳弧电流。本试验将稳弧电流降低 5 A,是由于从宏观角度讲,熔炼电弧受到水平磁场对其径向的分拉力,使弧柱断面被压缩,熔池受热面积向中心部位集中,导致铸锭心部等轴晶区凝固缓慢,为 Fe 元素结晶偏析提供了时间,降低稳弧电流后电弧在熔池表面分布范围更广,单位面积的热能降低,熔池径向冷却梯度减小,减轻结晶偏析的程度<sup>[20]</sup>。与此同时,将稳弧搅拌换向周期增加 10 s,提高了熔池的搅拌强度,熔融态合金流动速度加快,熔池雷诺数增大,对流传热系数增强,凝固时间缩短。且搅拌强度增大后,流体对于凝固前沿的冲刷效果加强,固液两相区宽度减小,破碎的枝晶被卷入熔池内部,为结晶提供了形核条件,提高了凝固速度,可有效抑制 Fe 元素偏析。

(5)优化补缩工艺 断弧后铸锭上表面热源转变为冷源,凝固方向转变为由四周向中心,在液固转变过程中体积收缩,最终凝固区域会形成缩松和缩孔。故在熔炼后期采用“逐级降电流,低电流保温”的补缩工艺,一方面使熔池上表面保持液态,另一方面不断提供熔融态合金补充熔池收缩。铸锭 B 增加补缩预留质量后,补缩阶段总时间延长,单位时间输入熔池的热量降低,铸

锭内部纵向温度梯度减小,有较为充足的时间使熔池深度抬高、锥度减小,Fe 元素在心部富集的情况得以改善。

### 3 结 论

(1)除锭底外,SP700 钛合金铸锭横截面上 Fe 含量由心部到边部递减,截面极差随着铸锭高度增加而增大。在铸锭纵向 Fe 元素沿边部指向冒口缩孔斜向上逐渐递增,呈现明显的正偏析趋势,偏析方向与凝固方向基本一致,与凝固过程相适应。

(2)选用合适的中间合金和布料方式,采用强冷却、低电流、大搅拌、长补缩的熔炼参数,可以有效抑制 SP700 钛合金铸锭中 Fe 的结晶偏析。改进后冒口心部 Fe 含量由 2.38% 下降为 2.03%,截面平均极差由 0.42% 下降为 0.284%。冒口横截面的晶粒尺寸明显缩小且更加均匀,Fe 元素在等轴晶区内偏析得到抑制。

### 参 考 文 献

- [1] 黄金昌.SP-700 钛合金的开发和应用[J].稀有金属与硬质合金,1998(3): 58-62.
- [2] 蔡建明,许超,郝孟一,等.SP700 和 Ti-6Al-4V 钛合金细晶组织的疲劳裂纹扩展特征[J].航空材料学报,2006(3): 71-74.
- [3] 朱晓翠,罗伟,崔文俊.SP700 钛合金薄板超塑性研究[J].湖南有色金属,2022,38(1): 43-45.
- [4] PARVIZIAN P, MORAKABATI M, SADEGHPOUR S. Effect of hot rolling and annealing temperatures on the microstructure and mechanical properties of SP-700 alloy[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2020, 27(3): 374-383.
- [5] 邱仟,王克鲁,鲁世强,等.SP700 钛合金热压缩失稳变形数值模拟研究[J].稀有金属材料与工程,2022,51(8): 2 985-2 991.
- [6] 党鹏,罗伟,李鹏,等.热处理对 SP700 钛合金板材组织及力学性能的影响[J].热加工工艺,2021,50(6): 123-126.

- [7] HAN D, ZHAO Y, ZENG W, et al. Investigation of slow eutectoid element on tensile properties and superplasticity of a forged SP700 titanium alloy[J]. Metals, 2021, 11(11): 1 852.
- [8] 李蒙,李晓燕,马家琨,等.SP700 钛合金板轧制过程的组织演变和力学性能研究[J].有色金属材料与工程,2019,40(3): 31-38.
- [9] CHUNG W C, TSAY L W, CHEN C. Microstructure and notch properties of heat-treated Ti-4.5Al-3V-2Mo-2Fe laser welds[J]. Materials Transactions, 2009, 50(3): 544-550.
- [10] 邱仟,王克鲁,鲁世强,等.SP700 钛合金高温流动行为及本构关系[J].材料热处理学报,2021,42(2): 145-151.
- [11] HAN D, ZHAO Y, ZENG W. Effect of Zr addition on the mechanical properties and superplasticity of a forged SP700 titanium alloy[J]. Materials, 2021, 14(4): 906-912.
- [12] HOTTA S, YAMADA K, MURAKAMI T, et al.  $\beta$  grain refinement due to small amounts of yttrium addition in  $\alpha+\beta$  type titanium alloy, SP-700[J]. ISIJ international, 2006, 46(1): 129-137.
- [13] 高平,赵永庆,毛小南,等.钛合金铸锭偏析规律的研究进展[J].钛工业进展,2009,26(1): 1-5.
- [14] 陈战乾,高颀,刘新,等.Ti-1023 合金铸锭铁偏析控制[J].钛工业进展,2003(Z1): 56-58.
- [15] 高平,赵永庆,于兰兰,等.TB6 钛合金铸锭中的偏析[J].热加工工艺,2009,38(17): 13-16.
- [16] 赵永庆,刘军林,周廉.典型  $\beta$  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(4): 531-538.
- [17] AZIZ M J. Model for solute redistribution during rapid solidification[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(2): 1 158-1 168.
- [18] 赵小花,李金山,杨治军,等.钛合金真空自耗电弧熔炼过程中温度场的数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2010,30(11): 1 001-1 004.
- [19] 廖葛,葛鹏,刘宇,等.大规格 Ti70 合金铸锭 Fe 元素偏析控制[J].稀有金属材料与工程,2020,49(3): 968-972.
- [20] 张利军,周中波,常辉,等.高钼含量  $\beta$  型钛合金的偏析行为及预防措施[J].中国有色金属学报,2013,23(8): 2 206-2 212.

(编辑:刘晨辉)

## 《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

