

铸态金铂合金的成分偏析调控研究

牛劲松^a, 胡 锐^{a,b*}, 罗 贤^a

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室^a 陕西省高性能精确成形技术与装备重点实验室^b, 西安 710072)

摘 要: 金铂合金以高密度、高硬度、良好的导电导热性能及超低剩磁矩和磁化率在航空领域中作为验证质量得到了广泛应用, 但金铂合金制备过程中存在着极为严重的成分偏析现象。本文主要针对此问题开展研究工作, 采用高频感应炉和喷铸两种工艺制备金铂合金样品, 通过多次道次轧制并结合固溶工艺研究金铂合金的成分偏析的分布状态, 结果表明, 高频感应炉制备的金铂合金成分偏析较为严重, 喷铸工艺成功实现对金铂合金成分偏析的调控, 通过 EDS 能谱分析发现喷铸工艺较感应熔炼工艺可将成分偏差由 20% 控制为 1%。随后利用 Anasys fluent 计算模拟得到金铂合金两种不同制备工艺下凝固过程中的温度场、流场及溶质场分布。

关键词: 成分偏析; 金铂合金; 有限元模拟; 溶质场

中图分类号: TG146.3⁺¹ **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2023)S1-0009-09

Study on the regulation of cast segregation of Au-Pt alloy

NIU Jinsong^a, HU Rui^{a,b*}, LUO Xian^a

(State Key Laboratory of Solidification Processing^a, Shaanxi Provincial Key Laboratory of High Performance Precision Forming Technology and Equipment^b, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Au-Pt alloy has been widely used in the aviation field as verification quality with high density, high hardness, good electrical and thermal conductivity, ultra-low residual magnetic moment and magnetic susceptibility. But there is a very serious component segregation phenomenon in the preparation process of Au-Pt alloy. This paper is mainly based on this research, high frequency induction furnace and spray casting two processes are used to prepare Au-Pt alloy samples, then the distribution state of component segregation of Au-Pt alloy is studied by multi-pass rolling combined with solution process, the results show that the high frequency induction furnace prepared Au-Pt alloy composition segregation is more serious and the spraying process successfully realizes the regulation of Au-Pt alloy component segregation. Through EDS energy spectrum analysis, it is found that the composition deviation of the spraying process can be controlled from 20% to 1% compared with the induction melting process. Subsequently, the Anasys fluent calculation simulation is used to obtain the temperature, flow and solute field distribution during the solidification process under two different preparation processes of Au-Pt alloy.

Key words: composition segregation; Au-Pt alloy; finite element simulation; solute field

金铂合金由于价格昂贵,应用受到了一定限制,但因其具有良好的化学稳定性和加工性能,在牙科、针灸、体内植入及医用生物传感器等方面有着广泛

应用^[1],此外,金铂合金作为航天航空探测器用材料,其磁学性能受到了广泛关注,但目前研究大多为理论研究及可行性评估^[6]。在合金的研发中,材

收稿日期: 2023-07-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2202300)

第一作者: 牛劲松, 男, 硕士研究生; 研究方向: 材料学; E-mail: niujinsong@mail.nwpu.edu.cn

*通信作者: 胡 锐, 男, 教授; 研究方向: 材料学; E-mail: rhu@nwpu.edu.cn

料制备是实现材料应用的重要环节,Ebert 等人通过熔体淬火,制备了合金体系 Au_xPt_{1-x} 的单相固体样品,发现在整个浓度范围内制备均匀样品是相当困难的^[8],然而,成分是否均匀对金铂合金的磁学性能有着较大影响。因此,有必要在前期样品制备过程中对铸态金铂合金进行偏析调控研究,为合金设计提供保障。

偏析主要是由于合金在凝固过程中扩散不充分、溶质再分配而引起的。在金铂合金的铸造过程中存在着严重的偏析问题,若采用传统试错法研究其熔炼工艺中的成分偏析调控问题,将会消耗大量的人力和物力。近年来,计算机技术在工程中的应用越来越广泛,可实现对液态金属的凝固过程可定性或半定量描述。目前,材料的铸态偏析模拟研究主要集中于宏观偏析和微观偏析,通过复现材料凝固过程中的温度场、溶质场及微观组织变化,可解决材料凝固偏析等问题^[9]。可以对凝固过程中的温度场、流场及溶质场变化进行精确地模拟。但是,现有的研究中大多均为针对于钛合金及钢材的凝固过程模拟,而鲜有对贵金属熔炼工艺的模拟,特别关于金铂合金铸态偏析模拟尚未见相关文献报导。

综上所述,为了解决金铂合金熔炼铸造制备过程中的成分偏析,本文拟采用有限元方法模拟合金

在不同熔炼工艺下,凝固过程中的温度场、溶质场变化情况,将实验与模拟相结合,建立相关模型及设置求解边界条件,开展成分偏析模拟计算,为金铂合金的制备工艺提供理论依据。

1 模拟及实验

1.1 模拟过程

Ansys Fluent 是国内外使用最多、最流行的 CFD 软件之一,它采用基于完全非结构化网格的有限体积法,有着丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能,可用于模拟纯材料以及合金的凝固/熔化。针对熔炼凝固过程的模拟,该软件主要使用焓-孔隙度技术对熔化/凝固模型建模,并且提供了两种确定液体分数与温度关系的规则,即线性杠杆规则和非线性 Scheil 规则。为了对比两种工艺对金铂合金成分偏析的影响,采用多组分运输与能量方程来进行两者之间的成分偏析模拟。由于温度的解本质上是能量方程和液体体积分数之间的迭代,因此,列出在凝固过程计算模拟中需要用到的方程式,为了简略描述,将其各个参数在表格 1 中给出明确定义^[15]。

表 1 凝固方程中各参量物理意义

Tab.1 Physical meaning of each parameter in the solidification equation

参量名称	物理意义	参量名称	物理意义
H_{ref}	参考焓	$T_{liquidus}$	液相线温度(1573 K)
L	真正潜热	T_{ref}	参考温度(300 K)
ϵ	防止除以 0 的小数	C_p	定压比热容
$Amush$	糊状区常数	β	液相体积分数
V_p	喷铸速率	$T_{solidus}$	固相线温度(1373 K)
α'	反扩散系数	C_0	初始浓度
T_o	初始温度	P_0	合金初始密度(20 g/cm ³)
C_s	固相元素浓度	C_l	液相元素浓度(0.27)
K_o	溶质平衡分配系数(0.5~0.9)	f_s	固相分数
T	瞬态温度	β_T	热膨胀系数(5.88×10 ⁻⁵)
B_e	溶质膨胀系数(1×10 ⁻⁶)		

1.1.1 能量方程

在 ANSYS Fluent 中,使用 Voller 和 Swamina - than 建议的方法更新液体分数。对于金铂合金,使用 Voller 和 Prakash 给出的基于比热的方法,材料的焓为潜热和显热的综合,如式(1)所示:

$$H=h+\Delta H \tag{1}$$

而显热表示为:

$$h=h_{ref}+\int_{T_{ref}}^T c_p dT \tag{2}$$

融化过程液相体积分数 β :

$$\begin{aligned}\beta &= 0 \\ \beta &= 1 \\ \beta &= \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}}\end{aligned}\quad (3)$$

根据液相体积分数 β , Fluent 可以直接通过度来判断物质是处于液态还是固态。当温度 T 低于固相线温度 $T_{solidus}$, 则凝固, 液相体积分数为 0, 同时孔隙率也为 0, 表示全是固态, 不流动; 相反, 若高于液相线温度 $T_{liquidus}$, 则融化, 液相体积分数为 1, 同时孔隙率也为 1, 表示全是液态, 正常流动; 而第三个公式则是对溶液来说, $T_{solidus}$ 和 $T_{liquidus}$ 不相等, 若温度处于两者之间, 则液相体积分数为无量纲化的温度。

相变潜热 ΔH :

$$\Delta H = \beta L \quad (4)$$

Fluent 将融化凝固模型将糊状区域(部分凝固区域)视为多孔介质。每个单元中的孔隙率设置为等于该单元中的液体分数。在完全凝固的区域中, 孔隙率等于 0, 流体速度为 0。动量源项如下:

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (5)$$

湍流方在糊状和凝固区的所有湍流方程中加入汇, 以说明固体物质的存在。

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \varphi \quad (6)$$

热传导过程中的偏微分方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{cp} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \alpha \nabla^2 T \quad (7)$$

计算域及边界条件设置:

在金铂合金实际熔炼过程中, 外部条件十分复杂, 为了得到合理的计算模型提出以下假设:

- 1) 熔体流动假定为层流和牛顿流体;
- 2) 热-溶质对流通过 Boussinesq 方法计算;
- 3) 区熔过程中溶质平衡配系数为常数;
- 4) 固-液界面处溶质再分配采用基于反扩散和枝晶粗化的 V-B 溶质偏析方程。凝固过程中液相区、固相区和固液两相区的流场、温度场和溶质场满足以下方程:

$$c_1 = c_0 [1 - (1 - \alpha' K_0) f_s] (K_0 - 1) / (1 - \alpha' K_0) = C_s / K_0 \quad (8)$$

$$\rho_1 = \rho_0 [1 - \beta_T (T - T_0) - \beta_C (c_1 - c_0)] \quad (9)$$

模型设置如下图 1 所示, 图 1(a)为感应加热模型边界条件设置, 图 1(b)为感应加热及喷铸模型边界条件设置。对于喷铸工艺, 假设熔融 Au-Pt 合金以恒定的速度和恒定的温度从入口进入该区域, 采用多组分运输模型, 假定周围温度为 300 k, 为了保持的自由表面的浇注温度, 使用恒温热源, 底部为水冷铜模, 四周为氧化铝坩埚, 在感应加热过程中, 流体无流动。其他设置如下所示: 基于压力速度耦合的耦合算法得到网格的独立收敛解, 计算梯度、压力和对流的离散化模型采用 Green-Gauss Cell-Based, 其他项采用二阶逆风作为离散化模型。打开湍流模型设置, 湍流模型选择层流模型, 求解设置、残差设置均保持默认。

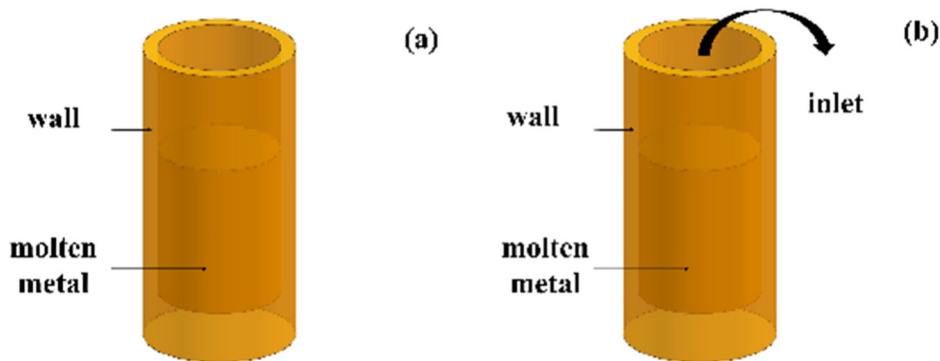


图 1 模型设置: (a)感应熔炼凝固模型; (b)喷铸凝固模型

Fig.1 Model settings: (a) Induction melting solidification model; (b) Spray casting solidification model

1.2 实验验证

金铂合金熔炼制备工艺分别为真空感应熔炼和喷铸。真空感应熔炼是利用电磁感应金属导体内部产生涡流加热炉料进行熔炼的方法,它具备便于温度压力控制、可回收易挥发元素、准确控制合金成分等特点,在工业生产中得到广泛应用^[16];而喷铸工艺是在感应加热基础上的进一步改进,通过在气压腔中吸入惰性气体,推动熔体在凝固之前快速进入模具之中,减少熔体在冷却时因凝固收缩引起的疏松等铸造缺陷,该方法兼顾了铜模导热性好和高压水流散热性好的优点。Bonny^[17]因 Au-27Pt 具备低磁化率、高密度、致密性及良好的导电导热性能,探究将 Au-27Pt 作为验证质量其加速度扰动的来源和大小,基于获得超低磁学性能的目的。本文的实验和模拟所选取的金铂合金成分为 Au-27Pt,采用感应加热方式对金铂合金样品进行熔炼,后通过均匀化退火(1100 °C/12 h)、多道次轧制(轧制变形量 30%)来改善金铂合金的成分偏析,进行实验验证;将感应加热后经固溶轧制样品重新剪碎成片,通过喷铸工艺制备,重复均匀化退火(1100 °C/12 h)、多道次轧制(轧制变形量 30%),进行实验验证。分析的样品分别为经感应加热后轧制样品,喷铸轧制样品,通过 Gemini sigima 300 扫描电镜对感应加热样品及感应加热喷铸样品随机选取十个点进行能谱

分析,探究其成分偏析改善情况。

2 结果和讨论

为了探究感应加热凝固及喷铸两种不同工艺对金铂合金成分偏析的影响,先采用 Anasys Fluent 实现了金铂合金在凝固过程中的温度场变化,截取了不同时间下金铂合金温度场具体分布情况,随后模拟喷铸工艺及感应熔炼两种工艺下金铂合金凝固过程的溶质场分布情况,并与最终实验结果进行对比。

2.1 感应加热金铂合金温度场、溶质场分析

图 2 展示了感应加热金铂合金在凝固过程中的温度场变化情况,图 2 中(a)、(b)、(c)分别为 5.0 s、10.0 s、15.0 s 的温度场分布情况,图中的 timestep 指的是时间步(等于 0.05 s)。结果表明随着凝固过程的进行温度区间从两侧到中心,从底部到顶部存在着较大的温差,随着凝固时间变化,从两侧到中心从底部到顶部的温度区间逐步减小,在纵向上温度区间由 100 °C 变为 60 °C,在横向上温度区间由 50 °C 变为 30 °C,这是由于导热系数不同所导致的。在金铂合金的凝固、冷却过程中,主要以热传导为主,温度场随着时间、空间变化。如式(7)所示表明在不同的位置及时间内其温度场存在着差异性。

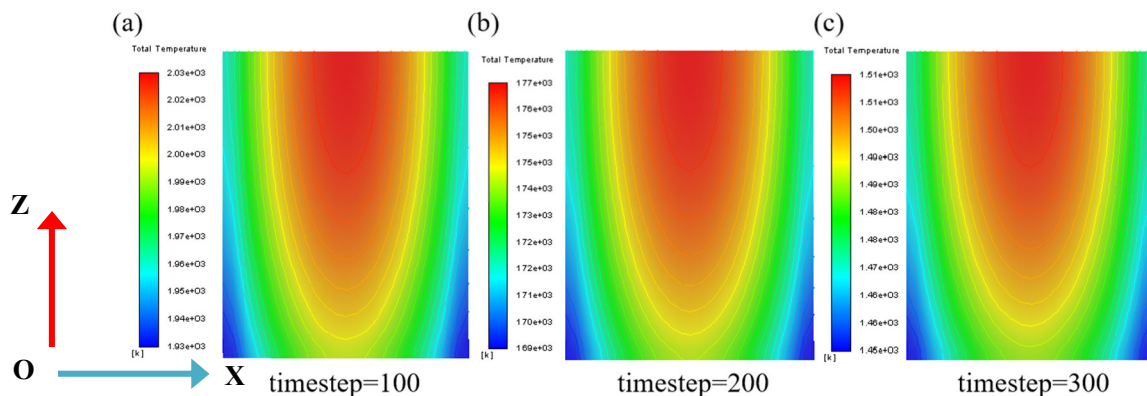


图 2 金铂合金(Au-27Pt)凝固过程中温度场分布: (a)5 s; (b)10 s; (c)15 s

Fig.2 Temperature field distribution during solidification of Au-Pt alloy (Au-27Pt): (a)5 s; (b)10 s; (c)15 s

图 3 对感应加热金铂合金纵截面上的溶质场进行了可视化处理,图 3 中(a)、(b)、(c)为 Pt 的溶质分布情况,(d)、(e)、(f)为 Au 的溶质分布情况。研究表明,Pt 的成分偏析主要集中于铸锭心部,具体表现为铸锭心部 Pt 的含量较高,成分最高可以达到 42%,在边部 Pt 的含量较低,成分为 21%。名

义成分为 Au-27Pt 合金铸锭在纵截面方向上的成分偏析可达到 $\pm 15\%$ 左右,而与之相反的是,铸锭边部 Au 的成分含量为 79%,心部 Au 的含量成分最低为 52%,熔体底部的成分较铸锭中上部均匀。这是由于金铂合金铸锭在凝固过程中,其冷速存在着较大的差异性,底部的冷却速度远远大于边部和顶部,

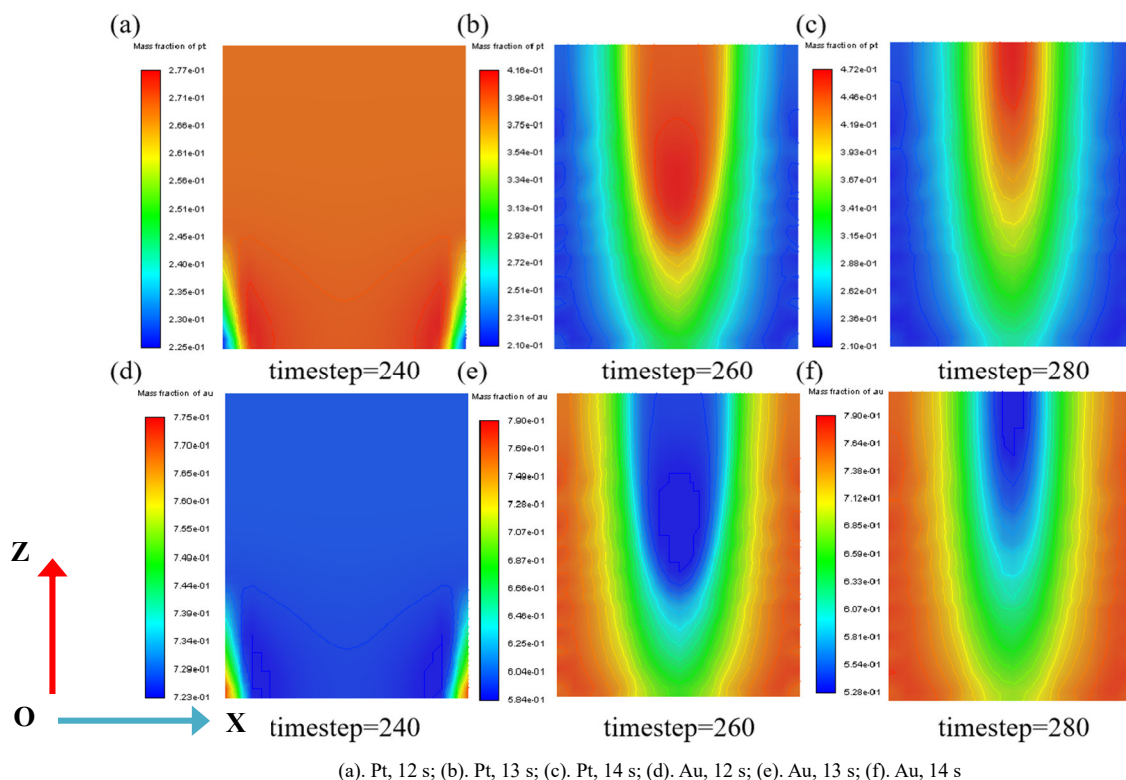


图 3 不同时刻下金铂合金(Au-27Pt)凝固过程中纵截面溶质场分布

Fig.3 Longitudinal cross-sectional solute field distribution at different times during solidification of Au-27Pt alloy

从而导致边部及铸锭底部的成分偏析较小。由于金铂合金的结晶温度范围较宽，加上导热系数的差异性，所以在铸锭的心部及顶部富铂区先凝固，即铂元素先析出，产生成分偏析，此偏析为逆偏析。

图 4 为感应加热金铂合金横截面上的溶质场可视化处理结果。图 4 中(a)、(b)、(c)为铂的溶质分布情况，(d)、(e)、(f)为金的溶质分布情况。结果表明：从边部到心部，铸锭的成分偏析愈发严重，且随着

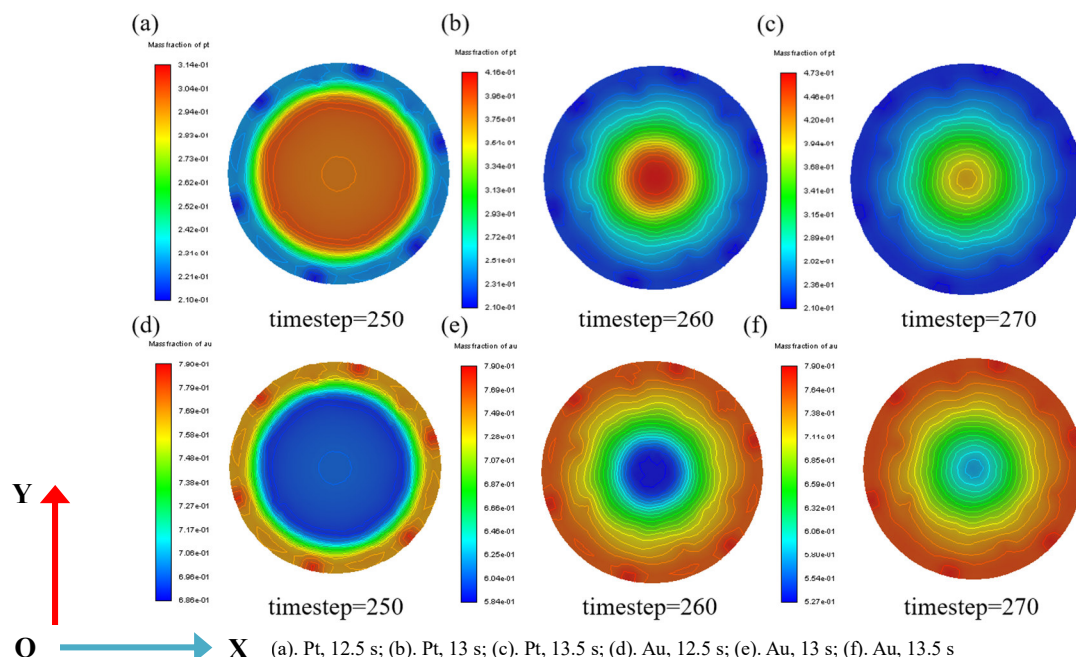


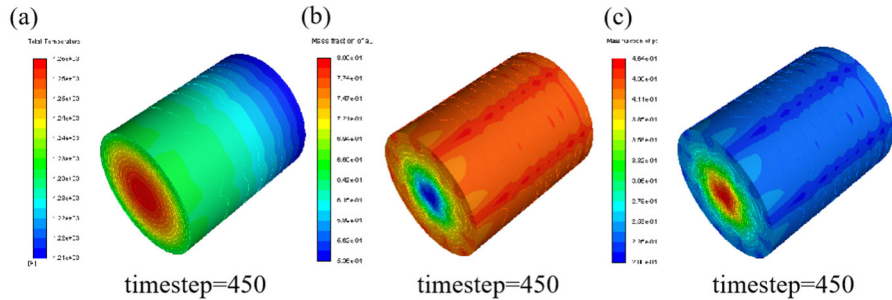
图 4 不同时刻下金铂合金(Au-27Pt)凝固过程中横截面溶质场分布

Fig.4 Cross-sectional solute field distribution at different times during solidification of Au-27Pt alloy

凝固时间的变化, 金铂合金溶质场也在不断变化, 名义成分 Au-27Pt 的合金铸锭在横截面上的成分偏析可达到 $\pm 15\%$ 左右。金铂合金的成分偏析呈现出典型的逆向偏析的特征。

图 5 对感应加热金铂合金铸锭 $t=22.5\text{ s}$ 时的温度场、溶质场进行了分析。图 5(a)为金铂合金凝固

过程中的温度场变化情况, 图 5(b)和图 5(c)分别为金铂合金凝固过程中 Au 和 Pt 的溶质场变化情况。结果表明: 由于导热系数的差异性, 铸锭底部的温度低于中上部, 边部温度低于心部温度。在溶质场中, 由于结晶温度范围较宽, 导致发生了逆偏析, 使得铂元素大量富集于熔体中心部位和顶部^[17]。



(a). 温度场(temperature field); (b). Au 溶质场(Au solute field); (c). Pt 溶质场(Pt solute field)

图 5 金铂合金(Au-27Pt)凝固过程中溶质场及温度场

Fig.5 Solute field and temperature field during solidification of Au-Pt alloy (Au-27Pt)

2.2 喷铸过程金铂合金温度场、流场及溶质场分析

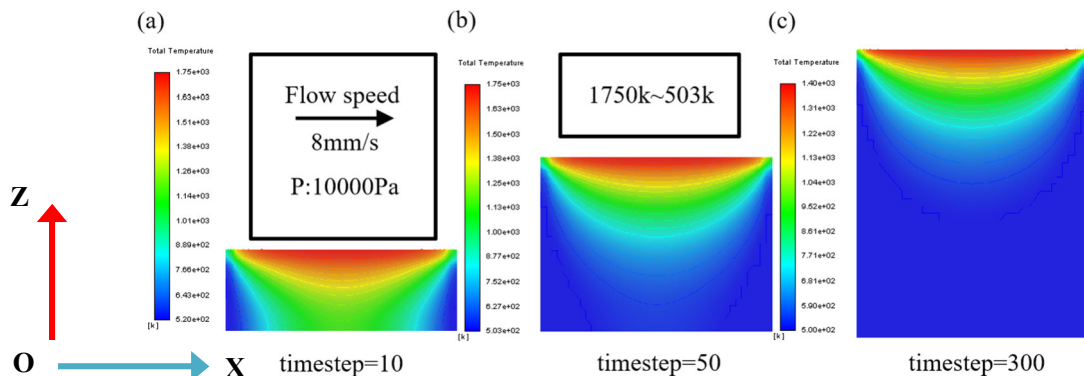
在对金铂合金的喷铸过程进行模拟时, 假设晶体以动网格的形式生长, 模拟结果如图 6 所示。

图 6 为金铂合金纵截面上温度场变化情况, 其中 timestep 的单位为 0.01 s , 结果表明: 在金铂合金凝固过程中, 由于坩埚底部导热情况高于两侧, 坩埚底部的温度略低于两侧, 铸锭中上部存在着较大的温度区间分布。

图 7 为喷铸过程中 Au 和 Pt 的溶质场分布情况, 对凝固初期和最终凝固状态进行了可视化处理, 图 7(a)、(b)、(c)为 Pt 元素分布情况, (d)、(e)、(f)为 Au 元素分布情况。可以看出在凝固初期, 由于冷速较快, Au 和 Pt 的成分偏析较小, 为 0.04% ; 随后当更多的熔体进入喷铸坩埚时, 随着冷速变慢,

成分偏析程度逐渐增大, 在纵截面上, 由于感应熔炼坩埚底部的熔体最先进入喷铸坩埚, 冷速较快, 所以喷铸坩埚底部的成分偏析较小, 在 1% 范围内波动, 而顶部的成分偏析可以达到 3% 左右, 越靠近中心部位, 成分偏析越严重。

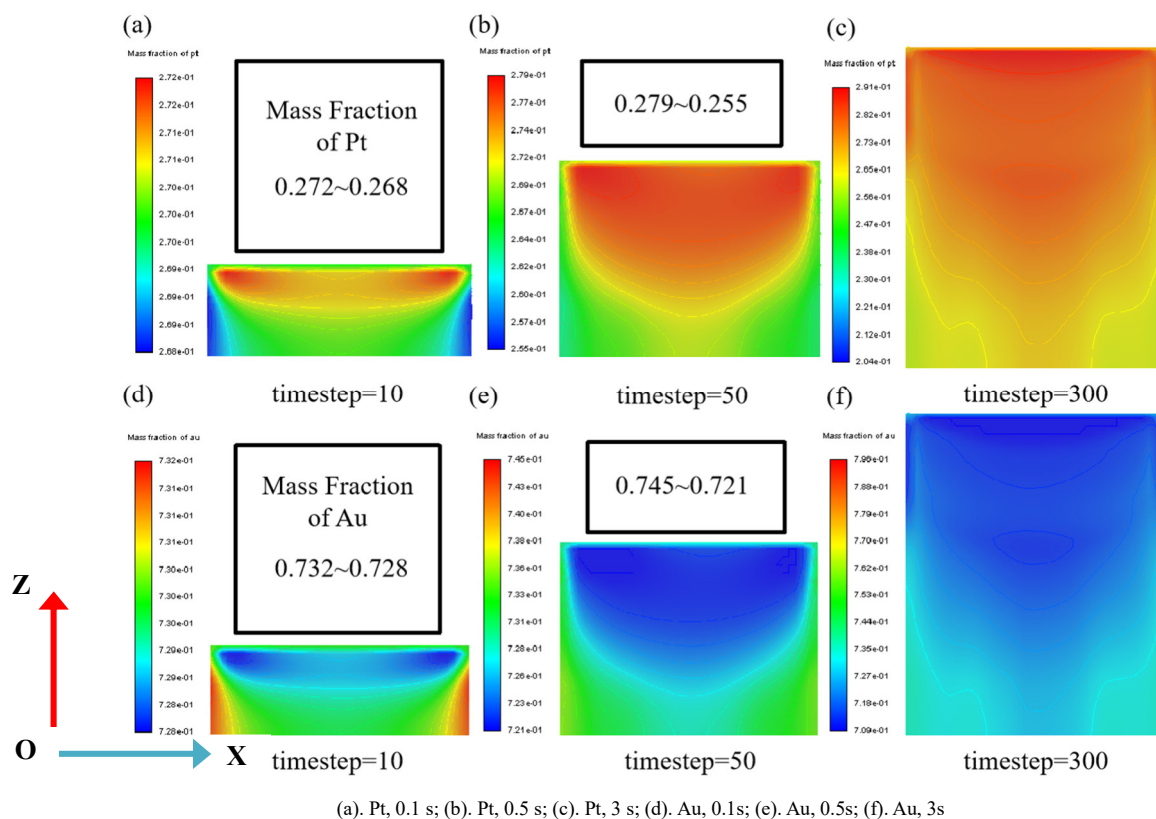
为了进一步观察金铂合金的成分偏析情况, 在图 8 中分别对喷铸横截面上的溶质场进行了可视化处理, 图 8 中(a)、(b)、(c)为 Pt 的溶质场分布情况, (d)、(e)、(f)为 Au 的溶质场分布情况。可以看出, 在凝固初期, 熔体边部和心部的成分偏差较小, 随着凝固进程的进行, 从边部到心部, Pt 元素逐渐偏聚, 在中心局部部位铂的成分为 30% , Au 的成分为 70% , 而在金铂合金边部, 可以认定其成分偏析在 1% 以内, 此成分偏析为负偏析。



(a). 0.1 s; (b). 0.5 s; (c). 3 s

图 6 Au-27Pt(喷铸工艺)凝固过程中温度场分布

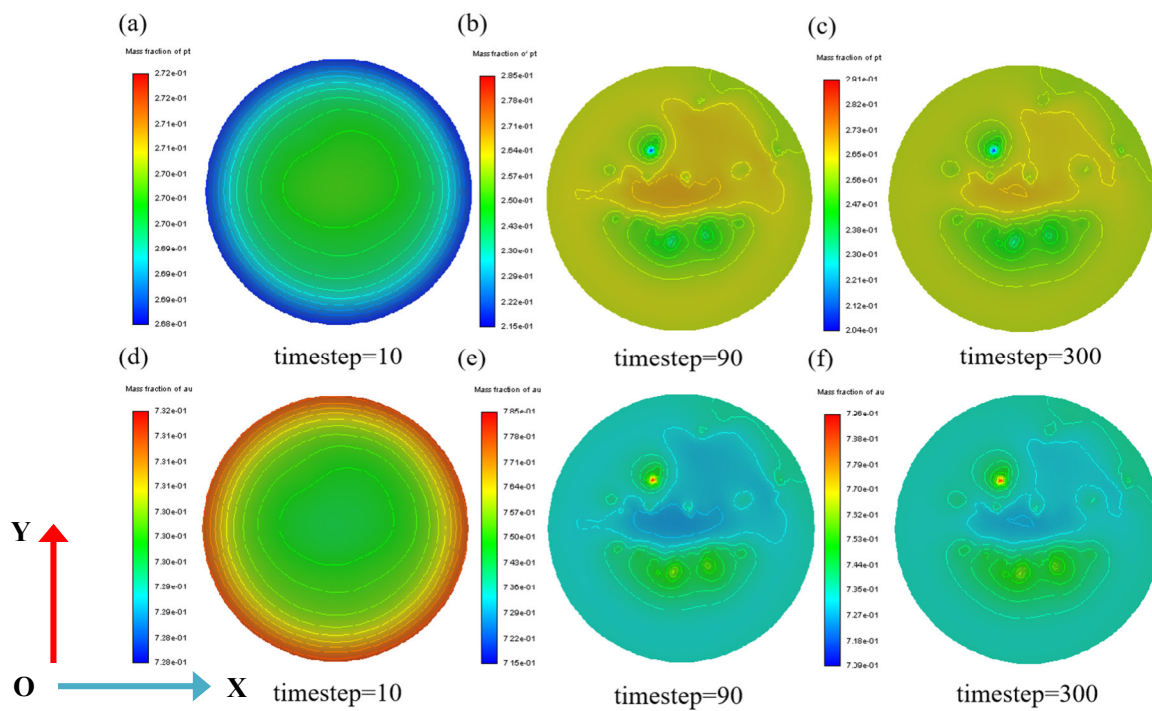
Fig.6 Temperature field distribution during solidification process of Au-27Pt (spray casting process)



(a). Pt, 0.1 s; (b). Pt, 0.5 s; (c). Pt, 3 s; (d). Au, 0.1s; (e). Au, 0.5s; (f). Au, 3s

图 7 不同时刻下金铂合金(Au-27Pt)凝固过程中纵截面溶质场分布

Fig.7 Longitudinal cross-sectional solute field distribution at different times during solidification of Au-27Pt alloy



(a). Pt, 0.1 s; (b). Pt, 0.9 s; (c). Pt, 3 s; (d). Au, 0.1 s; (e). Au, 0.9 s; (f). Au, 3 s

图 8 不同时刻下金铂合金(Au-27Pt)凝固过程中横截面溶质场分布

Fig.8 Cross-sectional solute field distribution at different times during solidification of Au-27Pt alloy

对喷铸金铂合金铸锭在 $t=3\text{ s}$ 时的铸件温度场、溶质场进行分析, 图 9(a)为金铂合金凝固过程中的温度场变化情况, 图 9(b)和(c)分别为金铂合金凝固过程中 Au 和 Pt 溶质场变化情况。图 9(a)表明, 由于冷却速度的差异, 铸锭边部和底部的温度远低于中上部位。对图 9(b)和图 9(c)中的数据进行分析可得, 在金铂合金铸锭中下部位, 成分与名义成分较为接近, 不存在明显的成分偏析, 而在中上部位, 由于冷却速度及结晶区间的原因, 存在着 3% 的成分偏析。感应熔炼及喷铸工艺制备所得金铂合金成

分偏析均为负偏析, 形成负偏析的原因是金铂合金的结晶温度范围较宽, 在结晶时形成发达的树枝晶, 由于各柱状晶只有尖端深入正面液体中, 柱状晶之间仍残留有大量液体, 这时柱状晶的生长主要依靠柱状晶之间的液体, 并向着与晶轴相垂直方向的扩散而进行, 导致正常偏析的纵向扩散降为次要地位。柱晶之间 Au 浓度逐步增高, 由于外部冷却收缩或凝固收缩而产生负压, 柱晶之间富集着 Au 的液体向外倒流, 从而导致逆向偏析的产生。

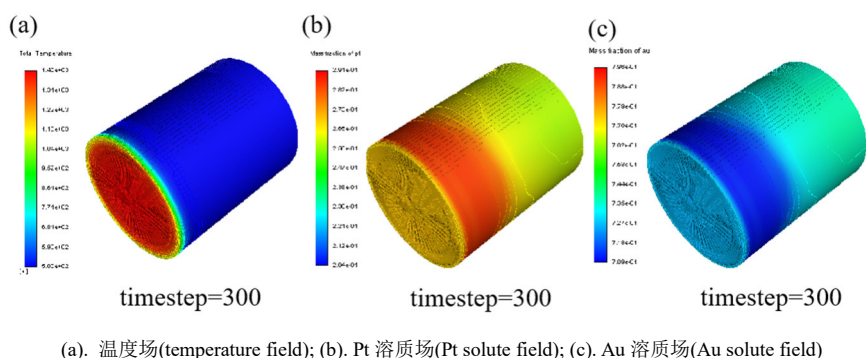


图 9 金铂合金(Au-27Pt)凝固过程中溶质场及温度场

Fig.9 Solute field and temperature field during solidification of Au-Pt alloy (Au-27Pt)

2.3 实验结果分析

为了对比两种熔炼凝固制备工艺下的金铂合金

的成分偏析调控情况, 选取轧制态样品进行分析, 测试结果如图 10 所示。

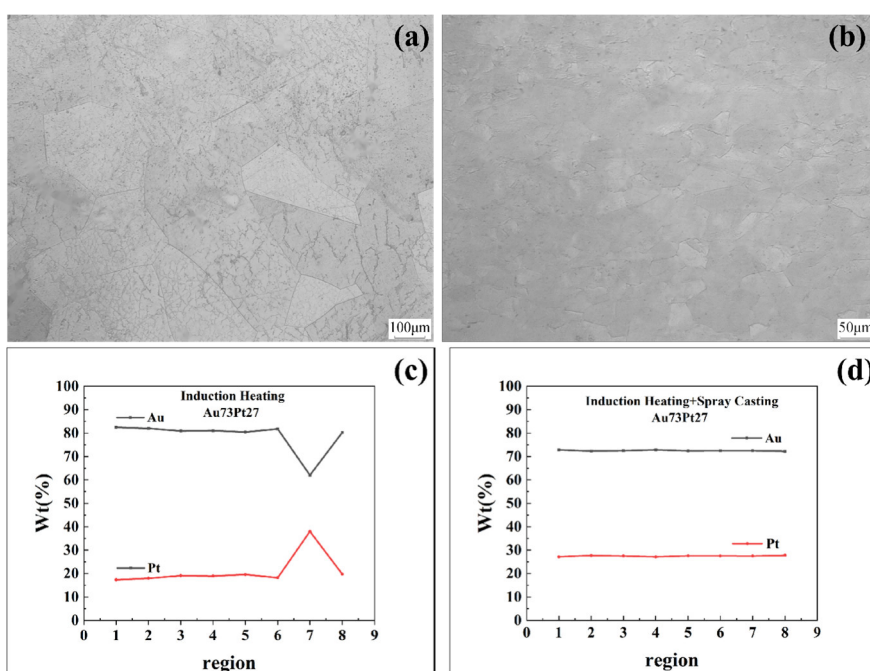


图 10 金铂合金组织图及能谱测试结果 Fig.10 Microstructure diagram and energy spectrum test results of Au-Pt alloy

图 10(a)和(b)为金铂合金感应熔炼及喷铸的金铂合金组织, 图 10(c)和图 10(d)分别为金铂合金感应加热及喷铸相对应的点扫能谱结果。图 10(a)的组织表明, 铸锭中存在着大量的二次枝晶, 图 10b 金铂合金组织图呈等轴晶分布, 与感应熔炼后的组织差异性较大。能谱测试结果表明, 感应熔炼后的成分在名义成分 15% 的范围内波动, 而喷铸后的样品成分在名义成分 1% 的范围内波动。

3 总结

采用 Anasys fluent 模拟了在两种熔炼铸造工艺下金铂合金凝固过程中的温度场、溶质场变化情况, 结果表明, 喷铸工艺可显著减小金铂合金的成分偏析。冷却速度对金铂合金的成分偏析存在着较大的影响在一定的范围内, 冷却速度越快, 成分偏析越小。喷铸固溶后的名义成分 Au-27Pt 合金呈等轴晶分布, 与感应熔炼固溶的样品组织形态存在着较大差异性, 喷铸后的成分偏析可控制到 1% 以内。

参考文献:

- [1] BHARDWAJ R, HAZRA A. Bimetals (Au-Pd, Au-Pt) loaded WO_3 hybridized graphene oxide FET sensors for selective detection of acetone[C]. Electronics and Mechatronics Conference, 2022: 9795839.
- [2] GOWTHAMANA N, SRIVASTAVAB V M. InP/AlGaAs based CSDG MOSFET with Au/Pt gate materials for high frequency/hybrid applications[C]. International Scientific Conference Electronics, 2021: 9579736.
- [3] EMI U, SHIHOKO I, KENICHI H. Magnetic susceptibility and hardness of Au-xPt-yNb alloys for biomedical applications[J]. Acta Biomaterialia. 2013, 9: 8449-8453.
- [4] 张雪晶, 韦纪英, 陈芳, 等. 金铂合金烤瓷冠对牙周组织的影响[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2021, 15(38): 7157-7160.
- [5] 孟晓慧, 刘克礼, 李培, 等. 后牙金铂合金全金属颈环烤瓷熔附金属全冠的应用价值[J]. 武警医学, 2015, 26(12): 1203-1205.
- [6] 张育林, 王兆魁, 刘红卫, 等. 纯引力轨道验证质量的制备方法: CN104898174B[P]. 2017-05-31.
- [7] ZEYANG Z, ZHAOKUI W, YULIN Z. Low magnetic disturbance analysis and testing of a novel proof mass type for gravitational reference sensor system[J]. Advances in Mechanical Engineering. 2019, 11(2): 1-9.
- [8] EBERT H, ABART J, VOITLÄNDER J. Magnetic susceptibility of AuPt_{1-x}[J]. Zeitschrift für Physikalische Chemie Neue Folge, 1985, 144: 223-229.
- [9] LEI G, XIANG M L, HAI G H, et al. Numerical study of aluminum segregation during electron beam cold hearth remelting for large-scale Ti-6wt%Al-4wt%V alloy round ingot[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, 139: 764-772.
- [10] YUTUO Z, YUN C, CHUNQING H. Phase-field simulation of solidification dendritic segregation in Ti-45Al alloy[J]. Research & Development. 2017, 14(3): 184-187.
- [11] 李明旭, 徐智帅, 伍美, 等. 多道次垂直区熔 In-1%Sn 合金过程的物理场数值模拟[J]. 上海金属, 2021, 43(5): 67-72.
- [12] 徐晓伟, 李军, 许振明, 等. 冶金法提纯废旧铝合金过程的溶质分布数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 53-56.
- [13] 殷筱, 沈军, 王灵水, 等. Sn-Cd 包晶合金定向凝固的多场耦合模拟[J]. 铸造技术. 2014, 35(10): 2171-2175.
- [14] HAITAO M, JIONGMING Z, RONG C, et al. Numerical simulation study on quality control of the center macroscopic segregation in the continuous casting slab[J]. Trans Indian Inst Met. 2019, 72(3): 825~835.
- [15] 约翰 D, 安德森, 吴颂平, 等. 计算流体力学基础及其应用[M]. 机械工业出版社, 2007.
- [16] 任晓, 肖晶. 高温合金真空感应熔炼工艺研究[J]. 世界有色金属, 2018(10): 18.
- [17] BONNY L S. Disturbance reduction requirements for LISA[J]. Classical & Quantum Gravity, 2003, 20: S239-S253.