

基于多包梯度成分的大型钢锭间歇浇注凝固反偏析工艺研究

张 婧¹, 孙统辉^{1, 2}, 陈慧琴¹, 王 芳¹, 李荣斌³

(1. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西太原 030024; 2. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南洛阳 471039;

3. 上海电机学院 上海大件热制造工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为解决大型钢锭浇注凝固过程中易出现的成分偏析难题, 以30Cr2Ni2Mo钢486 t大型钢锭为研究对象, 系统探究多包成分梯度、分包大小及每包浇注间隔时间对其五包成分梯度间歇浇注凝固反偏析工艺中C、Mo元素偏析程度的影响规律, 结合数值模拟方法开展工艺优化研究。结果表明: 与多包连续浇注凝固相比, 多包成分梯度间歇浇注凝固的凝固顺序曲线呈现多层波折特征, 打破了连续浇注的平滑曲线形态; 钢锭凝固终了时温度分布区间显著扩大, 冒口端表现为温度偏高、分布区域狭小且平缓, 锭尾则温度偏低、分布区域广阔; 每包浇注启动时, 会对前一包已形成的凝固界面产生局部重熔效应, 有效缓解前一包浇注间隔期内产生的成分偏析, 持续推进多包成分梯度间歇浇注凝固全过程, 最终实现钢锭成分的均匀化。通过工艺参数优化确定, 该486 t钢锭五包成分梯度间歇浇注凝固反偏析效果最优的工艺参数为: 浇注间隔时间24 400 s, C元素成分梯度递减幅度0.01%, Mo元素成分梯度递减幅度0.005%, 分包方式采用均等分包。钢锭完全凝固后, 锭身大部分区域C含量稳定在0.26%~0.29%, Mo含量控制在0.41%~0.44%, 成分分布均匀性良好, 相较于传统多包连续浇注整体凝固工艺, 显著降低了C、Mo元素的偏析程度, 为大型钢锭高质量浇注凝固工艺的工程应用提供了理论依据与技术支撑。

关键词: 大型钢锭; 成分偏析; 成分梯度; 间歇浇注凝固; 30Cr2Ni2Mo钢

中图分类号: TF771; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0798-09

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0102

Study on the Anti-Segregation Process of Large Steel Ingots by Intermittent Casting and Solidification Based on Multi-Ladle Gradient Composition

ZHANG Jing¹, SUN Tong-hui^{1, 2}, CHEN Hui-qin¹, WANG Fang¹, LI Rong-bin³

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Luoyang CITIC Heavy Industries Casting and Forging, Luoyang 471039, Henan, China; 3. Shanghai Engineering Research Center of Manufacturing, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To solve the tough problem of component segregation that is prone to occur during the casting and solidification process of large steel ingots, taking a 486 t large steel ingot of 30Cr2Ni2Mo steel as the research object, this study systematically explored the influence laws of multi-ladle composition gradient, ladle size and casting interval time of each ladle on the segregation degrees of C and Mo elements in the anti-segregation process of five-ladle composition gradient intermittent casting and solidification, and carried out process optimization research combined with numerical simulation methods. The results show that compared with multi-ladle continuous casting and solidification, the solidification sequence curve of multi-ladle composition gradient intermittent casting and solidification presents a multi-layer undulating characteristic, breaking the smooth curve shape of continuous casting; at the end of steel ingot solidification, the temperature distribution interval is significantly expanded, the riser end is characterized by higher temperature, narrow and gentle distribution area, while the nozzle end is characterized by lower temperature and wide distribution area; when each ladle starts casting, it will produce a local remelting effect on the solidification interface

基金项目: 上海大件热制造工程技术研究中心开放课题 (No.18DZ2253400)。

收稿日期: 2026-03-13 收到初稿, 2026-04-03 收到修订稿。

作者简介: 张婧 (2001-), 女, 硕士生, 主要从事大型铸锻件成形理论与新技术研究。E-mail: 17835232850@163.com

通信作者: 陈慧琴, 女, 教授, 博士。E-mail: chenhuiqin@tyust.edu.cn

引用格式: 张婧, 孙统辉, 陈慧琴, 等. 基于多包梯度成分的大型钢锭间歇浇注凝固反偏析工艺研究 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 798-806.

Zhang Jing, Sun Tonghui, Chen Huiqin, et al. Study on the anti-segregation process of large steel ingots by intermittent casting and solidification based on multi-ladle gradient composition [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 798-806.

formed by the previous ladle, effectively alleviating the component segregation generated during the casting interval of the previous ladle, continuously promoting the whole process of multi-ladle composition gradient intermittent casting and solidification, and finally realizing the homogenization of steel ingot composition. Through process parameter optimization, it is determined that the optimal process parameters for the anti-segregation effect of five-ladle composition gradient intermittent casting and solidification of the 486 t steel ingot are as follows: casting interval time of 24 400 s, C element composition gradient decreasing amplitude of 0.01%, Mo element composition gradient decreasing amplitude of 0.005%, and equal ladle size. After complete solidification of the steel ingot, the C content in most areas of the ingot body is stably between 0.26%-0.29%, and the Mo content is controlled between 0.41%-0.44%, with good uniformity of composition distribution. Compared with the traditional multi-ladle continuous casting and overall solidification process, the segregation degrees of C and Mo elements are significantly reduced, which provides a theoretical basis and technical support for the engineering application of high-quality casting and solidification process of large steel ingots.

Key words: large steel ingots; composition segregation; composition gradient; intermittent casting and solidification; 30Cr2Ni2Mo steel

为满足更高的性能与效率要求, 电力装备正持续向大型化、高端化的方向发展^[1-2]。高端大型装备是国家工业发展的重要支撑, 实现其高质量制造仍是当前装备制造面临的主要挑战^[3]。大型钢锭是制造大型高端锻件的关键原材料, 其质量直接决定装备性能, 而凝固缩孔、缩松及偏析等缺陷是制约其质量的主要因素。其中, 偏析缺陷产生的原因主要是凝固过程中溶质再分配导致溶质富集的液相与溶质贫乏的固相之间发生相对位移, 表现为溶质元素在钢锭宏观尺度上呈现非均匀分布现象^[4]。且偏析缺陷一旦形成, 难以通过后续常规热加工工艺予以消除^[5-6]。偏析缺陷会显著劣化最终锻件质量, 影响服役性能。因此, 对于高品质合金锻件, 其铸锭的偏析程度通常须满足极为严格的技术标准。偏析缺陷已成为限制高端装备制造技术发展的关键问题^[7-8]。

为改善偏析缺陷, 科研工作者已开展了大量的研究工作。付建义等^[6]研究发现, 增加冒口绝热板厚度使C偏析指数降低了34%。Ghodrati^[9]等研究发现, 改变热顶区域的热导率会导致凝固时间增加, 从而影响偏析分布。Zhang^[10]等研究发现, 提高填充速率有助于降低铸锭不同区域的宏观偏析程度。李会玲^[11]等研究发现, 冷却速率的提高会使Cu-9Ni-6Sn铸造合金中锡元素的周期性偏析得到抑制。张永权^[12]采用定向凝固技术, 基本消除了普通大钢锭中存在的二次缩孔和V形偏析。王迎光等^[13]研究发现, 在增材制造齿条钢钢锭中, 采用较短的浇注间隔与较多的增材层数, 可使中心偏析指数的波动范围较传统浇注工艺降低26.3%。刘钦等^[14]研究发现, 在固定压下区间约束下, 板坯连铸时铸坯拉速和低过热度对控制中心偏析缺陷有影响。李江南^[15]研究发现, 连铸工艺中增加二冷区比水量会使中心碳元素含量降低0.012%。魏亚芳等^[16]和Yang^[17]等研究发现, 电磁搅拌能极大改善铸坯宏观偏析, 进而提高铸坯品质。

葛洪硕等^[18]研究发现, 采用轻压下工艺可有效抑制齿轮钢铸坯的偏析。Luo^[19]等研究发现, 在二

冷段电磁搅拌器电磁搅拌(S-EMS)结合机械压下(MR)工艺中, 具有两对相反方向电磁搅拌辊的S-EMS显著影响中心线碳偏析。范翔宇^[20]研究发现, 降低电流强度或增大钢锭直径对真空自耗电弧熔炼大体积TC4钛合金钢锭宏观偏析具有抑制作用。Liu^[21]等研究发现, 相较于连续电磁搅拌, 交替搅拌方式更有利于减轻碳偏析。Huang^[22]等研究发现, K500合金电渣重熔锭中铝、钛的偏析程度随金属池深度的增加而加剧。蒋日鹏等^[23]研究发现, 超声波和氩气冷却的共同作用对改善2219铝合金成分偏析缺陷具有积极作用。Xu^[24]等提出了一种在钢液中添加无机吸热材料(IHAM)以提高大钢锭质量的新方法。Yu^[25]等研究发现, 采用无机材料棒冷却钢液的吸热法(HAM)可减少钢锭上部正偏析和下部负偏析。Sun^[26]等研究了无机材料插入深度对2.5吨42CrMo铸锭凝固组织和宏观偏析的影响。Li^[27]等详细介绍了一种称为分层铸造的新型铸造方法, 该方法能有效减少大铸锭的宏观偏析, 是制备高均质大铸锭的一种极具前景的方法。

大型钢锭由于尺寸大, 凝固过程缓慢, 偏析倾向严重。上述通过优化保温冒口、提高冷却速度、加快填充速率以及采用低过热度浇注等措施, 对改善大型钢锭的偏析均有积极作用, 但改善程度有限; 同时, 大型钢锭的自身尺寸也限制了电磁搅拌和无机吸热材料在改善偏析方面的效果。然而, 多包浇注本身属于一种增材制坯方式, 若能合理设计多包浇注的成分梯度, 精准控制浇注工艺参数与间隔时间, 则可实现偏析的最大限度控制。

大型钢锭制造成本高, 而凝固过程的数值模拟方法, 因其能够直观展现凝固中间过程、成本相对较低以及可重复性高等优势, 是探究大型钢锭宏观偏析规律的重要研究工具^[28-29]。本研究采用数值模拟软件, 首先模拟分析了某大型钢锭多包成分梯度连续浇注反偏析工艺, 并进行了试验验证。然后, 在大型钢锭传统多包连续浇注整体凝固工艺模拟分析的基础上, 研究了多包成分梯度、浇注间隔时间和分包大小三个关

键因素对多包成分梯度浇注凝固工艺下成分偏析的影响，为实际生产提供有力支撑和数据参考。

1 486 t钢锭模型的建立及研究方案

1.1 486 t钢锭网格划分

486 t钢锭冒口端处锭身直径为3 610 mm，锭身高度为4 965 mm。完成三维建模的32棱钢锭、钢锭模、冒口套、冒口模的几何实体模型并进行装配，如图1

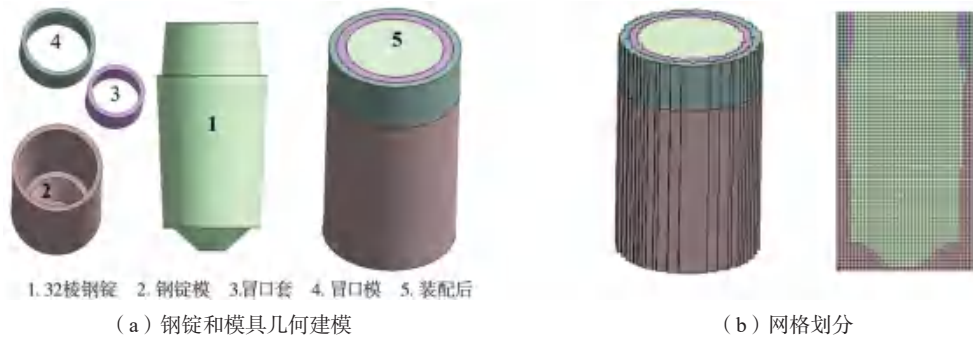


图1 486 t钢锭和模具几何建模与网格划分
Fig.1 Geometrical modeling and mesh generation of the 486 t steel ingot and mold

表1 30Cr2Ni2Mo的化学成分
Tab. 1 The chemical composition of 30Cr2Ni2Mo w_B/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
0.26~0.34	0.17~0.37	0.30~0.60	≤0.035	≤0.035	1.80~2.20	1.80~2.20	0.30~0.50	≤0.02

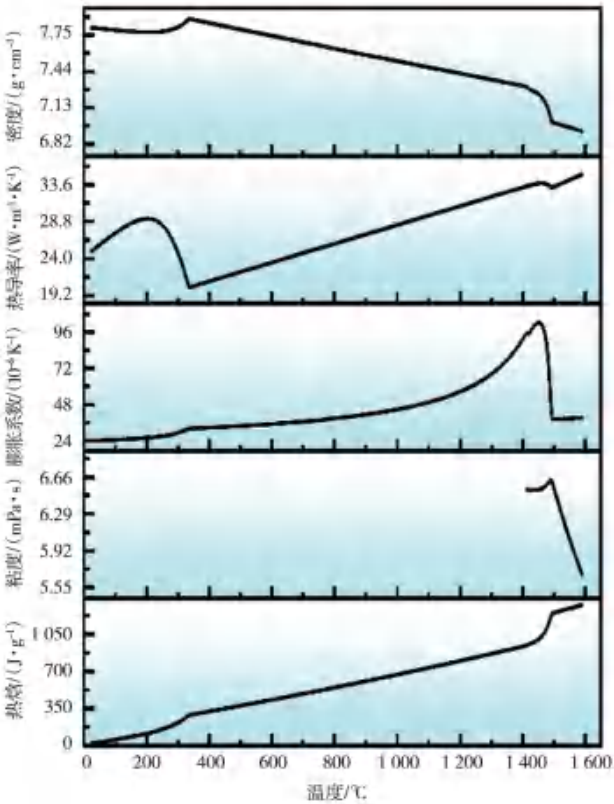


图2 材料热物理性能参数图
Fig. 2 Thermo-physical parameters of the material

(a)所示。导入AnyCasting铸造模拟软件进行均匀六面体网格划分，如图1 (b)所示，网格平均边长103 mm，共划分58 400个网格。

1.2 材料热物理性能参数计算

材料采用30Cr2Ni2Mo钢，其化学成分如表1所示。采用JMatPro热力学软件计算模拟所需的材料热物理参数等，如图2所示。其液相线温度为1 492 ℃，固相线温度为1 412 ℃。

1.3 凝固工艺模拟参数

钢锭模和冒口模材料均为HT150，冒口套材料为高铝砖。钢锭模、冒口模、冒口套的初始温度分别为50 ℃、320 ℃、650 ℃。选择钢锭的子午面进行分析，采用上注法浇注，浇口面积为3 594 556.5 mm²。一次浇注整体凝固的浇注温度为1 566 ℃，浇注速度为0.003 2 m/s，浇注时长为2 728 s。钢锭和冒口模、冒口套的界面换热系数为100 W/(m²·K)，钢锭模和冒口模的界面换热系数为2 W/(m²·K)，冒口模和冒口套的界面换热系数为30 W/(m²·K)，参考文献[30]设置钢锭和钢锭模的界面换热系数如图3所示。冒口为保温冒口，成分偏析计算所需溶质参数如表2所示。

1.4 大型钢锭多包成分梯度连续浇注凝固反偏析工艺模拟分析与验证

某生产用30Cr2Ni2Mo钢486 t钢锭，分五包成分梯度连续浇注，浇入的钢包吨位依次为65 t、60 t、150 t、150 t、65 t。五包C含量依次为0.34%、0.32%、0.30%、0.28%、0.26%。五包Mo含量依次为0.48%、0.44、0.40%、0.36%、0.32%。计算得每浇包充型率分别为13.3%、12.2%、30.6%、30.6%、13.3%。凝固后锭

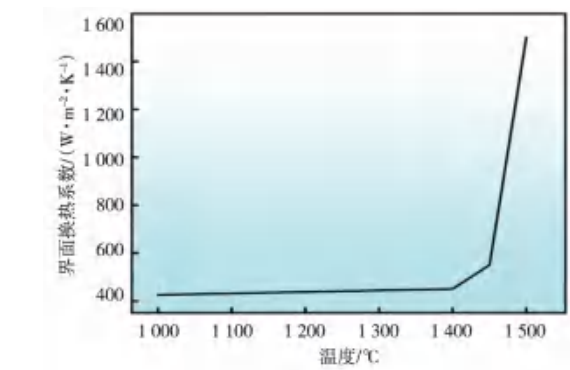


图3 钢锭-锭模的界面换热系数
Fig. 3 The heat transfer coefficient at the interface between the steel ingot and the mold

表2 成分偏析计算所需溶质参数
Tab. 2 Solute parameters required for the segregation calculation

元素	初始浓度/%	平衡分配系数	溶质膨胀系数/%	溶质扩散率/(m ² ·s ⁻¹)	二次枝晶臂间距/m
C	0.30	0.34	0.011	1.3 × 10 ⁻⁹	0.000 4
Mo	0.45	0.56	-0.001 92		

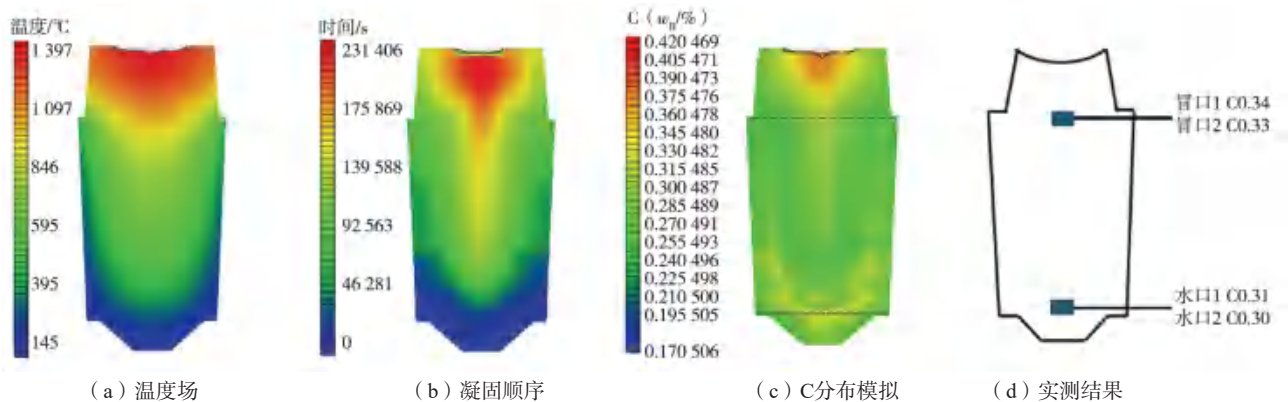


图4 温度场、凝固顺序、C元素成分分布模拟结果和实测结果
Fig. 4 The simulation results of the temperature field, solidification sequence and carbon concentration distribution, and the C content test results

注, 计算得出浇注时间如表3所示, 相应的浇注温度按梯度递增1℃设置, 根据一次浇注整体凝固的偏析结果和C元素标准成分范围0.26%~0.34%, Mo元素标准成分范围0.30%~0.50%, 设置C含量0.01%递减, Mo含量0.005%递减的如表3所示的成分梯度。第一包钢液在1 s时开始补浇。

表3 多包浇注时间、温度和成分
Tab. 3 The multi-ladle pouring times, temperatures and composition

浇包数	开始浇注时间/s	温度/℃	成分/%	
第1包	1	1 566	C 0.33	Mo 0.465
第2包	24 660.2	1 567	C 0.32	Mo 0.460
第3包	49 628.4	1 568	C 0.31	Mo 0.455
第4包	74 569.6	1 569	C 0.30	Mo 0.450
第5包	99 556.8	1 570	C 0.29	Mo 0.445

身冒口端和锭尾C成分检测位置如图4(d)所示, 每个位置取2个试样进行检测。

1.5 大型钢锭多包成分梯度浇注凝固工艺对成分偏析的影响

1.5.1 大型钢锭多包连续浇注整体凝固工艺模拟分析
吨位等分且成分相同的5包钢液, 连续浇注, 整体凝固。其中C和Mo含量分别为0.3%和0.45%。

1.5.2 多包成分梯度浇注间隔时间对偏析结果的影响
通过设置每包钢液的浇注时间和元素成分实现多包成分梯度浇注, 研究多包成分梯度间歇浇注凝固工艺对偏析的影响。根据钢锭吨位, 设计等分五包浇

1.5.3 多包成分梯度变化对偏析结果的影响
为了探究成分梯度变化对偏析结果的影响, 在优化结果下, 根据一次浇注偏析结果和C、Mo元素标准成分范围设置如表4所示的成分梯度进行研究。

1.5.4 分包大小对偏析结果的影响
为探究分包大小对偏析结果的影响, 在间隔大小和成分梯度优化的结果下, 以充型率为基准, 设置五种分包方案如表5所示。其中, 方案1-方案5的分包规律依次为均等分包、中间大头尾小、两边大中间小、递增、递减。

2 结果分析

模拟分析了1.4某生产用30Cr2Ni2Mo钢486 t钢锭, 分五包成分梯度连续浇注凝固的反偏析工艺。根据实际分包浇注条件进行模拟, 凝固结束后的温度场、凝

表4 多包浇注成分梯度
Tab. 4 Multi-ladle pouring composition gradients

浇包数	方案一		方案二		方案三		方案四	
	C	Mo	C	Mo	C	Mo	C	Mo
第1包	0.33	0.465	0.33	0.48	0.315	0.465	0.315	0.48
第2包	0.32	0.460	0.32	0.47	0.310	0.460	0.310	0.47
第3包	0.31	0.455	0.31	0.46	0.305	0.455	0.305	0.46
第4包	0.30	0.450	0.30	0.45	0.300	0.450	0.300	0.45
第5包	0.29	0.445	0.29	0.44	0.295	0.445	0.295	0.44

表5 多包浇注钢液分包大小
Tab. 5 The sizes of steel liquid split ladles for the multi-ladle pouring process

浇包数	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
第1包	20	9.5	35	10	30
第2包	20	27	10	15	25
第3包	20	27	10	20	20
第4包	20	27	10	25	15
第5包	20	9.5	35	30	10

固顺序和C元素成分分布模拟结果与实测结果如图4所示。可以看出，凝固结束后冒口顶端最高温度为1 397 ℃，钢锭锭尾最低温度为145 ℃，凝固顺序明显分层。由图4（d）可见，锭身冒口端C含量的实测结果分别为0.33%和0.34%，平均值为0.335%；钢锭尾C含量的实测结果分别为0.31%和0.30%，平均值为0.305%。相应位置C含量的模拟结果分别为0.33%和0.31%，与试验结果吻合。模拟结果还显示，分包成分梯度浇注后，钢锭整个截面上的C元素成分分布较均匀，锭身大部分区域的分成分范围在0.26%~0.31%之间，锭身中心和底部局部区域在0.33%~0.345%之间，锭身中径处有一个很窄的倒V型低C含量偏析区，C含量约为0.20%。说明实际生产中的分包吨位和相应的成分梯度并非最佳方案，仍有优化空间。

3 大型钢锭多包成分梯度浇注凝固工艺对成分偏析的影响

3.1 传统多包连续浇注整体凝固模拟结果分析

模拟分析了1.5部分中30Cr2Ni2Mo钢486 t钢锭在传统成分相同条件下的多包连续浇注整体凝固过程。图5所示为多包连续浇注并整体凝固后的温度场、凝固顺序、C和Mo偏析云图。可以看出，整体凝固结束时，图5（a）中钢锭内的温度呈现从钢锭底部到冒口顶部、从钢锭表面到钢锭中心逐渐升高的梯度分布。冒口顶端最高温度为1 395 ℃，钢锭锭尾最低温度为191 ℃。由此决定了图5（b）的凝固顺序：由钢锭底部和与钢锭模接触的表面逐渐向上、向中心凝固，冒口部位最后凝固的顺序凝固。图5（c）中，钢锭两侧和锭尾出现C含量在0.24%~0.28%之间的负偏析区域，钢锭中心部位出现C含量为0.37%的细长正偏析区域，钢锭冒口端C含量最高达到0.43%。图5（d）中Mo元素偏析趋势与图5（c）中C元素偏析分布趋势相近，锭尾和钢锭两侧出现0.39%~0.42%的负偏析区域，钢锭中心部位和冒口端出现0.49%~0.55%的正偏析区域。除水口和冒口部分外，锭身C含量范围为0.24%~0.37%，Mo含量范围为0.40%~0.50%。锭身外层的负偏析区C、Mo含量分别为

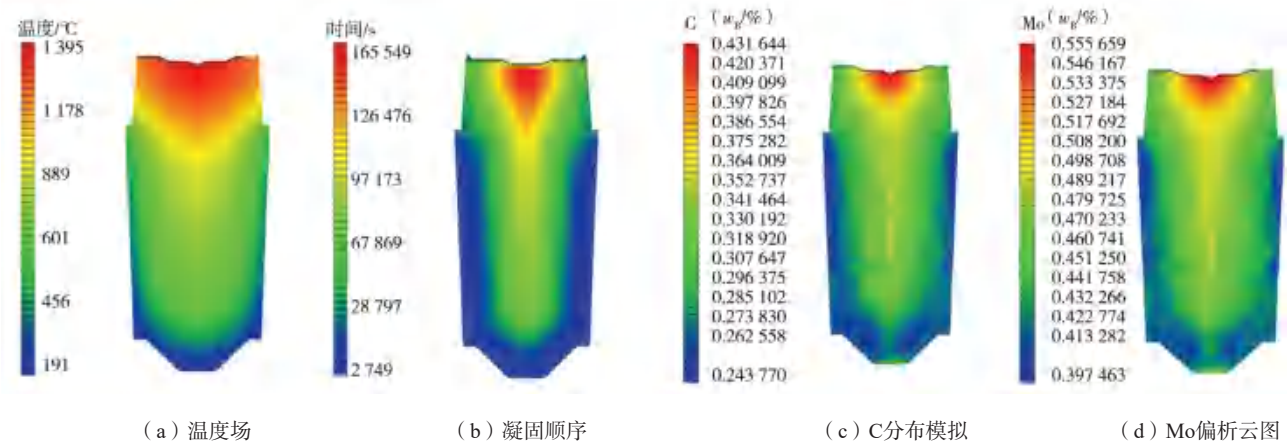


图5 多包连续浇注整体凝固后的温度场、凝固顺序、C分布云图和Mo分布云图

Fig. 5 The temperature field, solidification sequence, C and Mo distribution cloud maps after multi-ladle continuous pouring and global solidification

0.24%和0.40%，钢锭中心正偏析区C、Mo含量分别为0.37%和0.50%。

3.2 多包成分梯度浇注间隔时间对偏析结果的影响

根据图5连续浇注整体凝固时间和C、Mo成分偏析分布结果，制定表3浇注间隔时间及其相应的浇注温度和成分梯度。图6是不同间隔大小的多包成分梯度浇注间歇凝固C元素成分分布云图。图6（a）浇注间隔时间为24 400 s时，凝固后钢锭整体上C元素成分分布更

为均匀，反偏析结果较好。对比之下，图6（a）-图6（c）钢锭中心部位C含量为0.37%以上的细长正偏析区域控制在冒口线以上，C含量为0.34%~0.36%之间的细长正偏析区域越来越长；图6（d）-图6（f）随着浇注间隔时间继续减小，钢锭中心C含量为0.37%以上的细长正偏析区域出现在冒口线以下，且越来越长，偏析程度逐渐加剧。可知，适当的浇注间隔时间有利于获得较好的多包成分梯度浇注的反偏析效果。

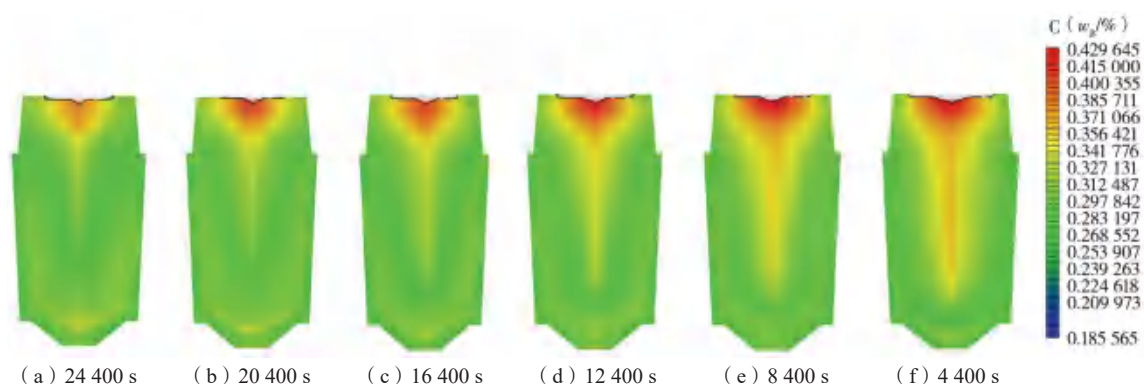


图6 浇注间隔时间对C分布的影响

Fig. 6 The influence of pouring interval times on the C distributions

3.3 多包成分梯度对偏析结果的影响

根据图5连续浇注整体凝固时间、C、Mo成分偏析分布结果以及相应的标准成分范围，设置如表4所示的成分梯度进行研究。图7是图6（a）浇注间隔时间和表4不同成分梯度下C元素成分分布云图。图7（a）采用方案一的成分梯度，C成分分布较为均匀，反偏析结果相比其他方案最优。图7（b）与图7（a）相比，钢锭底部C含量为0.345%的正偏析区域面积增大；图7（c）钢锭出现负偏析区域，对比方案一和方案三，Mo元素梯度不变，C元素梯度的减小影响了C的偏析程度，与其他三个方案相比，反偏析结果最差。图7（d）与图7（a）结果相近，但钢锭出现C含量为0.24%的少量负偏析区域。因此，多包成分梯度的设计对反偏析效果的

影响显著。

3.4 分包大小对偏析结果的影响

在图6（a）间隔大小和图7（a）成分梯度优化的结果下，以充型率为基准，设置五种分包方式如表5所示。图8是表5五种分包方式的C元素成分分布云图。图8（a）中C成分整体上分布均匀，反偏析结果较好。图8（b）钢锭中心部位和底部出现的正偏析区域面积大于图8（a），偏析程度高。图8（c）冒口线以下钢锭两侧出现负偏析区域；图8（d）、（e）钢锭出现大量负偏析区域，远离平均成分，成分分布更不均匀。因此，等吨位分包有利于获得成分均匀的大型钢锭。

综上所述，对于30Cr2Ni2Mo钢486 t钢锭，多包成

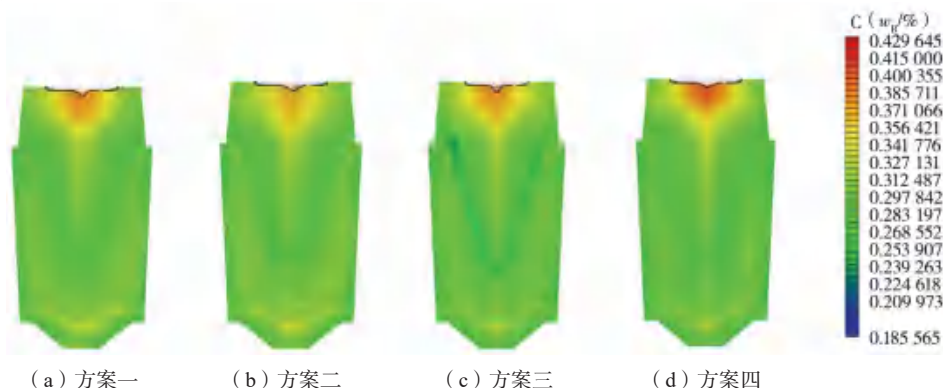


图7 浇包成分梯度对C分布的影响

Fig. 7 The influence of component gradients for each ladle on the C distributions

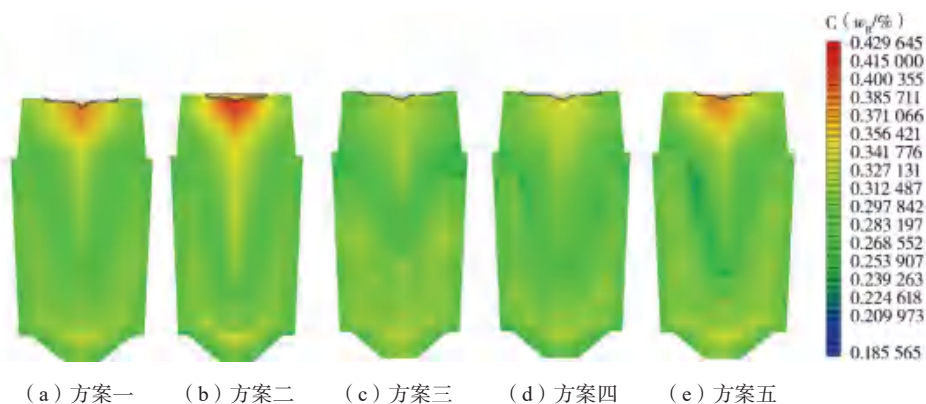


图8 分包方式对C分布的影响

Fig. 8 The influence of ladle splitting methods on the C distributions

分梯度间歇浇注凝固反偏析效果最佳的工艺参数为浇注间隔时间为24 400 s; C成分梯度选用方案一; 分包大小为均等分包。优化后的C、Mo偏析结果如图9所示。与多包连续浇注整体凝固偏析结果(图5(c)、(d))相比, 图9(a)中C元素最高含量降低了0.05%, 图9(b)中Mo元素最高含量降低了0.04%, 两者的C和Mo元素偏析程度有明显差距。图9(a)中锭

身C含量在0.26%~0.33%之间, 图9(b)中锭身Mo含量在0.41%~0.47%之间, 成分分布都较为均匀, 且Mo元素的成分偏析趋势与C元素的成分偏析趋势相近。多包成分梯度间歇浇注凝固工艺明显减弱了钢锭的元素偏析程度。

4 讨论

与多包连续浇注整体凝固相比, 多包成分梯度间歇浇注凝固工艺在充型和凝固顺序、温度和降低元素偏析方面有显著的差异。多包成分梯度浇注的充型顺序明显分层。图10(a)为五包均等浇注, 浇注结束后五层分布明显, 且充型过程中钢锭中心层间发生局部干涉, 中间层对已浇注钢液层的干涉最强。多包成分梯度间歇浇注凝固顺序(图10(b))明显呈现出纵向多层凝固特征, 不再是浇注整体凝固顺序(图5(b))的平滑分布。虽然依旧是由下向上、由外到内的, 但接近冒口线的钢锭两侧的部分不是最先凝固的, 最后凝固的区域面积也明显变大。多包浇注第1浇凝固结束凝固率达79.1%时, 开始第2浇; 第2浇充型结束凝固率达36.8%, 第2包浇入的钢液导致第1包已凝固

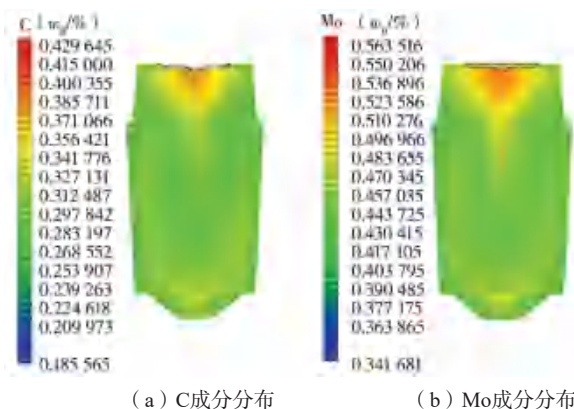


图9 多包成分梯度间歇浇注凝固C(a)和Mo(b)的成分偏析云图
Fig. 9 The C(a) and Mo(b) concentration segregation cloud maps after the multi-ladle composition gradient intermittent casting and solidification

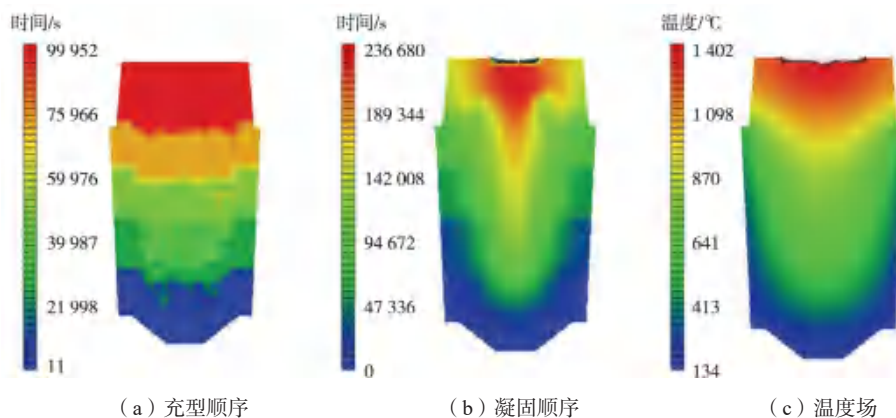


图10 多包成分梯度间歇浇注凝固的充型顺序、凝固顺序和温度场

Fig. 10 The mold filling sequence, solidification sequence, and temperature field after multi-ladle composition gradient intermittent casting and solidification

的钢液重熔了42.3%，超过第1包钢液凝固率的一半，直至第2包凝固结束时凝固率达到80%时，开始第3浇；第3浇充型结束凝固率达51.9%，导致已凝固的钢液重熔28.1%，重熔率小于已凝固钢液的一半，直至开始第4浇时凝固率达到82%；第4浇充型结束凝固率达58%，已凝固的钢液重熔了24%，开始第5浇时凝固率达到82.5%；第5浇使钢液充型到100%，已凝固的钢液重熔了14.1%，此时凝固率达68.4%，至此直到凝固完全结束凝固率达100%，钢锭成型。由此可见，每包开始浇注时已浇注的钢液凝固率在80%附近，且已凝固钢液的重熔率随着每包的浇注不断下降。因此，同一时刻的凝固曲线与整体凝固顺序曲线（图5（b））有差异，不再是平滑的曲线，而是出现多段波折，这正是由于多包间歇浇注凝固导致的上一包已凝固金属重熔改变了凝固顺序，使凝固曲线变得弯折。

多包间歇浇注凝固的温度曲线（图10（c））和整体凝固的温度曲线（图5（a））分布趋势相近，但多包间歇浇注凝固温度最高为1 402 ℃，高于整体凝固的最高温度1 395 ℃；最低温度134 ℃，低于整体凝固的最低温度191 ℃，钢锭整体上温度范围更广，钢锭底部的低温区域相较于整体凝固（图5（a））更大，

钢锭冒口及冒口线附近的高温区域与整体凝固（图5（a））的高温区域相比较小，分布更加平缓。

图11（a）第1浇间隔时间凝固结束时，出现C含量在0.34%~0.37%之间正偏析区域。图11（a）-（d）前4浇间隔时间凝固结束时，倒锥形正偏析区域C的最高含量逐渐降低，由最初出现的0.37%降至0.35%。第2浇充型结束（图11（b）充型结束）时，浇入的钢液稀释了第一包凝固时溶质再分配所排出的C元素，使正偏析区域的C含量明显降低，含量低于倒锥形正偏析区域（图11（a）凝固结束）的最低值0.34%，第2包浇入的钢液整体上聚集在0.32%附近。第3浇和第4浇也具有同样的规律，后一包的浇注稀释了C的正偏析，明显减弱前一包C的偏析程度，使C元素成分分布更为均匀。图11（e）第5包的浇入使倒锥形正偏析区域的C元素含量由0.35%降低到0.34%，相比前4浇对C的稀释程度较低，但仍就出现正偏析区域。完全凝固后，C含量为0.37%以上的正偏析区域控制在冒口线之上。除冒口端外，C元素成分整体上聚集在平均成分0.3%附近。基于上述讨论，多包成分梯度间歇浇注凝固反偏析工艺使元素成分分布更为均匀，可以有效降低元素的偏析程度，获得了大型均质钢锭。

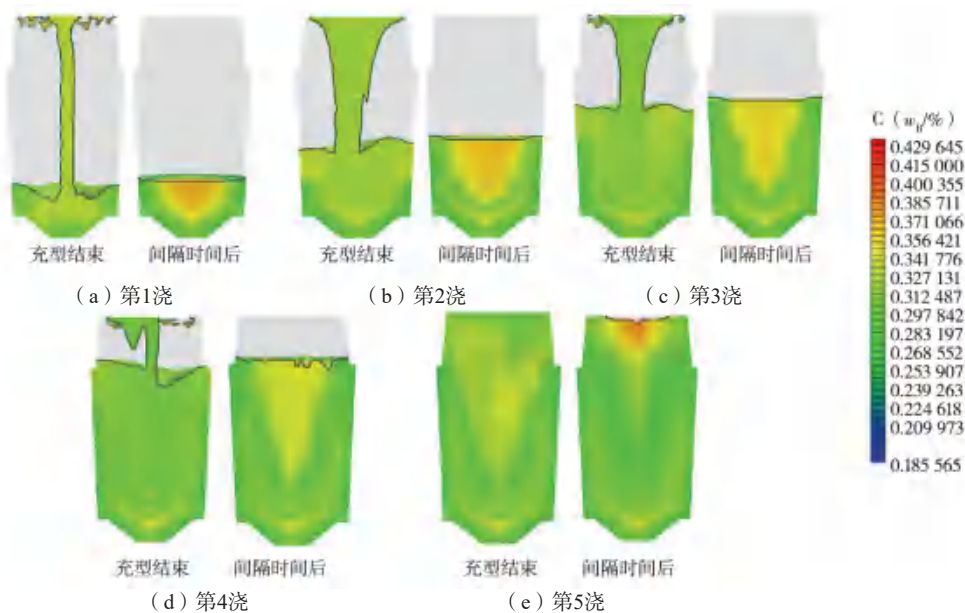


图11 多包成分梯度间歇浇注凝固过程C元素成分变化云图

Fig. 11 The C concentration variation cloud maps during multi-ladle composition gradient intermittent casting and solidification process

5 结论

（1）多包成分梯度间歇浇注凝固反偏析工艺，可以改善大型钢锭中的C、Mo元素偏析。其中多包成分梯度、分包大小和每包浇注间隔时间显著影响C、Mo元素偏析程度，是影响多包成分梯度间歇浇注凝固反偏析效果的主要工艺参数。

（2）多包成分梯度间歇浇注凝固过程中，凝固顺序曲线出现多层波折，不再是多包连续浇注凝固的平滑曲线；钢锭凝固结束时温度分布区间增大，表现为冒口端的温度更高、区域更小、分布平缓，以及锭尾的温度更低、区域更大；每包开始浇注时，对已浇注凝固到一定程度的区域进行局部重熔混合，从而减轻间隔时间内的成分偏析，直至完成多包成分梯度的间

歇浇注凝固过程,实现钢锭成分的均匀化。

(3) 30Cr2Ni2Mo钢486 t钢锭,多包成分梯度间歇浇注凝固反偏析效果最佳的工艺参数为浇注间隔时间为24 400 s; C成分梯度选用方案一; 分包大小为均

等分包。优化后锭身大部分区域C含量在0.26%~0.29%之间、Mo含量在0.41%~0.44%之间,成分分布均较为均匀,明显减弱了传统多包连续浇注整体凝固钢锭的元素偏析程度。

参考文献:

- [1] 张琛,邓伟.中国风电产业发展现状及趋势研究[J].机电产品开发与创新,2023,36(3):206-208.
- [2] 刘平,张媛,莫堃,等.风力发电设备技术现状与发展趋势[J].中国重型装备,2022(4):1-6.
- [3] 俞占扬,张慧,干勇,等.钢锭铸造过程中宏观偏析的研究进展[J].中国冶金,2021,31(5):6-11.
- [4] Flemings M C. Our understanding of macrosegregation. past and present[J]. ISIJ International, 2000, 40(9):833-841.
- [5] 沈厚发,陈康欣,柳百成.钢锭铸造过程宏观偏析数值模拟[J].金属学报,2018,54(2):151-160.
- [6] 付建义,刘钦,肖佳,等.冒口设计对轴承钢模铸钢锭头部偏析的影响[J].中国冶金,2025,35(11):90-100.
- [7] 高建军,巴钧涛.超大型钢锭制造技术研究[J].大型铸锻件,2013(2):7-9.
- [8] 柳百成.加强产学研结合提高大型铸件自主创新能力[J].装备制造,2008(Z1):103-105.
- [9] Ghodrati N, Champlaud H, Morin J-B, et al. Influence of the hot-top thermal regime on the severity and extent of macrosegregation in large-size steel ingots[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2024, 8(2):74-95.
- [10] Zhang C, Loucif A, Jahazi M, et al. FE modelling and prediction of macrosegregation patterns in large size steel ingots: influence of filling rate[J]. Metals, 2022, 12(1):29-41.
- [11] 李会玲,陈晨,魏亚风,等.凝固冷却速率对Cu-9Ni-6Sn合金组织和元素偏析行为的影响[J].机械工程材料,2026,50(2):80-86.
- [12] 张永权.大型钢锭定向凝固技术的发展[J].钢铁研究学报,1995(4):83-89.
- [13] 王迎光,郭庆涛,任能,等.工业级齿条钢铸锭液体增材制造工艺设计及试验研究[J].特种铸造及有色合金,2025,45(7):1086-1092.
- [14] 刘钦,杨震,关锐,等.基于多相凝固模型的X65管线钢连铸过程溶质偏析缺陷控制[J].连铸,2025,44(5):65-73.
- [15] 李江南.基于ProCAST的GCr15轴承钢凝固过程的模拟研究[D].石家庄:河北科技大学,2024.
- [16] 魏亚芳,邓安元,王恩刚.电磁搅拌改善连铸钢坯宏观偏析的研究现状和发展[J].特种铸造及有色合金,2024,44(4):451-456.
- [17] Yang Q S, Duan J X, Deng A Y, et al. Numerical simulation of macrosegregation phenomenon in Cu-6wt%Ag alloy ingots fabricated by electromagnetic stirring[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 28:300-315.
- [18] 葛洪硕,任一峰,张广军.8620系齿轮钢300 mm×340 mm铸坯宏观偏析改善[J].特殊钢,2023,44(3):69-73.
- [19] Luo S, Li K, Wang W, et al. Numerical simulation of macrosegregation in continuously cast slab with application of S-EMS and MR[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24:6893-6907.
- [20] 范翔宇.真空自耗电弧/感应熔炼大体积钛合金铸锭的宏观偏析研究[D].广州:华南理工大学,2024.
- [21] Liu D, Zhang G, Zeng J, et al. Numerical simulation of segregation in slabs under different secondary cooling electromagnetic stirring modes[J]. Materials, 2024, 17(11):2721-2736.
- [22] Huang X, Du K, Zhu Y, et al. Study on solidification and macrosegregation of aluminium and titanium in the electroslag remelted ingots of K500 alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 39:5027-5036.
- [23] 蒋日鹏,刘京柱,李瑞卿,等.超声与氩气冷却对2219铝合金组织及偏析的影响[J].铸造技术,2024,45(5):440-445.
- [24] Xu Y, Wang J, Shuai S, et al. Improving microstructure and segregation of steel ingot by inorganic heat absorption method[J]. Materials Science and Technology, 2023, 39(16):2544-2555.
- [25] Yu S, Zhu L Q, Lai J H, et al. Application of heat absorption method to reduce macrosegregation during solidification of bearing steel ingot[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29:1915-1926.
- [26] Sun S, Du Y, Zhang Z, et al. The Influence of Insertion Depth of Inorganic Materials on Solidification Microstructure and Segregation of 2.5-ton 42CrMo Ingot[J]. Metals, 2024, 14(7):753-768.
- [27] Li J, Xu X W, Ren N, et al. A review on prediction of casting defects in steel ingots: from macrosegregation to multi-defect model[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2022, 29:1901-1914.
- [28] 柳百成.建模与仿真在装备制造中的作用与前景[J].航空制造技术,2008(3):26-29.
- [29] Nishimura T, Kishimoto A, Tani K, et al. Development of 3D macrosegregation analysis technique for a 19-ton steel ingot with complex shape[J]. International Journal of Metalcasting, 2023, 17(4):2958-2968.
- [30] 盛星星.锻造钢锭的几何因素对其内部缺陷影响的数值模拟研究[D].鞍山:辽宁科技大学,2015.