

隔片 - 孕育剂复合孕育工艺对 D2 钢铸态组织与偏析的改善

宋嘉成, 邓沛然, 董 玮, 王宇轩, 欧嘉林, 孙 佳

(上海工程技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: D2钢(国标牌号Cr12Mo1V1)属于高碳高铬型莱氏体模具钢, 具备优异的淬透性与耐磨性, 在模具制造领域应用广泛, 但高碳高铬成分易导致其冶炼凝固过程中共晶碳化物不均匀析出, 进而影响材料力学性能与加工性能。本研究采用浇注试验方法, 结合金相显微镜分析与扫描电子显微镜(SEM)观察技术, 系统探究隔片配合孕育剂的复合孕育工艺对D2钢铸态组织的调控作用, 明确该工艺在晶粒细化、改善元素偏析及优化碳化物分布方面的作用机理。结果表明: 单一孕育剂处理对铸件整体晶粒细化效果有限; 添加隔片的浇注工艺可有效细化晶粒, 且不同隔片厚度对晶粒细化效果存在显著差异; 隔片与孕育剂协同作用的复合孕育工艺, 对D2钢铸态晶粒的细化效果最优, 其中最优工艺组的晶粒尺寸相较于传统浇注工艺铸件减小76%, 显著改善了铸态组织均匀性。

关键词: D2钢; Cr12Mo1V1钢; 复合孕育工艺; 孕育剂; 铸态组织; 晶粒细化; 元素偏析; 共晶碳化物

中图分类号: TG244.3; TG142.45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0807-10

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0103

Improvement of As-Cast Microstructure and Segregation of D2 Steel by Spacer-Inoculant Composite Inoculation Process

SONG Jia-cheng, DENG Pei-ran, DONG Wei, WANG Yu-xuan, OU Jia-lin, SUN Jia

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: D2 steel (Chinese national standard grade: Cr12Mo1V1) is a high-carbon and high-chromium ledeburitic die steel, which has excellent hardenability and wear resistance and is widely used in the field of die manufacturing. However, its high carbon and chromium content easily leads to the uneven precipitation of eutectic carbides during the smelting and solidification processes, thereby affecting the mechanical properties and processing performance of the material. In this study, casting experiments were carried out, combined with metallographic microscope analysis and scanning electron microscope (SEM) observation technology, to systematically explore the regulatory effect of the composite inoculation process of spacers combined with inoculants on the as-cast microstructure of D2 steel, and clarify the mechanism of this process in grain refinement, improvement of element segregation and optimization of carbide distribution. The experimental results show that the single inoculant treatment has a limited effect on the overall grain refinement of the castings; the casting process with spacers can effectively refine the grain size, and different spacer thicknesses have significant differences in the grain refinement effect; the composite inoculation process with the synergistic effect of spacers and inoculants has the best grain refinement effect on the as-cast grains of D2 steel. Among them, the grain size of the optimal process group is reduced by 76% compared with that of the castings produced by the traditional casting process, which significantly improves the uniformity of the as-cast microstructure.

Key words: D2 steel; Cr12Mo1V1 steel; composite inoculation process; inoculant; as-cast microstructure; grain refinement; element segregation; eutectic carbide

D2钢作为高碳高铬莱氏体模具钢的典型代表, 具有优异的硬度、强度和耐磨性^[1-2], 该钢种广泛应用于

模具、冷成形冲头、成形轧辊和刀片等构件的制造, 且在新兴航天工业领域亦有应用^[3-4]。D2钢的优异性

基金项目: 上海市高峰学科 (0235-A1-5300-24-090802- 高水平 - 高峰学科 - 材料科学与工程)。

收稿日期: 2026-01-19 收到初稿, 2026-04-20 收到修订稿。

作者简介: 宋嘉成 (2001-), 男, 硕士, 主要研究方向为钢铁材料的凝固成形。E-mail: 1933752952@qq.com

通信作者: 邓沛然, 男, 博士, 硕士生导师。电话: 13917520577, E-mail: peirandeng@126.com

引用格式: 宋嘉成, 邓沛然, 董玮, 等. 隔片 - 孕育剂复合孕育工艺对 D2 钢铸态组织与偏析的改善 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 807-816.

Song Jiacheng, Deng Peiran, Dong Wei, et al. Improvement of as-cast microstructure and segregation of D2 steel by spacer-inoculant composite inoculation process [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 807-816.

能源于其铸造过程中大量共晶碳化物 (M_7C_3) 的析出与形成,但这种大量碳化物的偏析会降低材料冲击韧性,导致受力时易发生脆性断裂^[4]。从凝固过程来看,该钢晶界易形成大量连续网状分布的粗大共晶碳化物^[5-6],进一步加剧了组织不均匀对使用性能的不利影响^[7-8]。

模具钢的传统铸造冷却缓慢,易形成粗大共晶碳化物与网状结构,不仅破坏组织均匀性,还会降低材料韧性、导致热处理开裂,显著影响产品合格率^[8]。针对模具钢生产中的偏析及晶粒粗大问题,国内外研究者开展了技术探索,采用凝固过程中添加稀土元素^[9-11]以及提高凝固冷却速率^[12-14]等措施,来控制大尺寸碳化物的析出行为,通过冶金工艺和后续处理来控制碳化物,电磁搅拌、电渣重熔和合理的热处理制度都能够有效控制碳化物形貌^[15-18]。Yuxiang Liu^[19]研究了在D2冷作模具钢中添加重稀土元素Y,以改善其碳化物形貌和分布,从而提高其抗冲击性。Junchen Liu^[20]研究了D2冷作模具钢凝固过程中冷却速率对碳化物特征的影响,发现冷却速率在特定范围内变化会改变碳化物的数量、尺寸及层间距但不影响其类型,同时阐明了主要碳化物(六方中空棒状 M_7C_3)的形成机制。已有的方法虽然能有效地控制D2钢在凝固成形过程中碳化物的析出情况,但是中大型铸件的厚壁处偏析仍是一个难以解决的问题^[21],这个位置高温时间长,变质剂易因高温熔化而失效,其他条件下行之有效的一些方法也难以在这类铸件中应用。

孕育剂的添加可显著调控铸锭的共晶团数量^[22]。施加孕育处理能够降低奥氏体枝晶的析出温度,并有效提升共晶凝固温度^[23]。合金元素的协同作用以及孕育剂优异的抗衰退性能,能够有效改善铸件凝固后的力学性能与切削加工性能,其机制在于孕育处理可显著抑制自由渗碳体析出并降低显微疏松倾向^[24-25]。合金孕育剂包含铝、锆、钡、镁和锰等元素,其添加会对铸件奥氏体晶粒度与疲劳性能产生影响^[26]。钡具有典型的体心立方晶体结构,且在铁中基本不溶解。Lux和Tannenberger于20世纪60年代对含钡孕育剂开展了相关研究,结果表明,钡可有效降低Fe-C-Si合金的过冷度,减小白口层厚度。在孕育处理过程中,钡的作用主要体现为使碳颗粒在凝固铸铁组织中分布更为均匀^[27]。

大型钢锭尺寸大、凝固时间长、钢液流动剧烈,制备过程中不可避免出现宏观偏析、组织不均和夹杂物聚集等缺陷,且后续加工难以消除^[28]。基于增材制造思路,Yingguang Wang^[29]提出“化整为零”分步浇注-逐层凝固分层铸造方法,可显著降低试验钢锭的

宏观偏析等缺陷,为大型均质钢锭的制备提供了可行路径。Honggang Zhong^[30]提出的钢液与保护渣逐层浇注、逐层保护技术,同样能够改善钢锭凝固质量,具有良好的工程应用前景。针对大型钢铸件出现的组织不均与宏观偏析问题,Shen Sun^[31]研究了分层铸造的工艺,分层浇注与逐层凝固能够限制钢液流动及溶质传输范围,有效抑制溶质宏观偏聚,从而显著改善大型钢锭的内部均匀性与质量水平。

本课题针对D2钢传统重力铸造工艺,开展复合孕育新工艺研究。通过内置隔片分隔熔体区域,即采用D2钢片将尺寸为 $\Phi 80\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 的规格圆柱状型腔先分隔出若干区域。探究不同孕育工艺处理后D2钢凝固组织与力学性能的演变,明确其对凝固微观组织的影响;并通过细化晶粒、优化溶质凝固分布,改善材料组织状态,提升铸造组织质量。此举可为工业中改善大尺寸铸件微观组织提供新途径,推动其在更广泛工业领域的应用。

1 试验材料与方法

本试验以探究不同孕育工艺对D2钢铸态组织的调控作用为核心目标,采用真空中频感应熔炼技术制备 $\Phi 80\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 规格圆柱状铸锭,通过设计多组对比试验系统分析工艺参数对组织性能的影响规律。

试验原材料严格遵循D2钢成分标准及熔炼工艺要求精准选配:合金原料选用微碳铬铁、高碳锰铁、钒铁与钼铁,分别用于精准调控铬元素含量、补充锰元素、保障钒元素达标及提供钼元素,所有铁合金原料均经过熔点验证,确保在中频炉限定熔炼温度下可完全熔化;碳源采用纯度99.97%的高纯度碳小颗粒,有效避免杂质元素对钢液纯净度的干扰;孕育剂选用硅钡合金,该合金具有较高熔点,将其加入高温钢液后,不会因为高温熔化而导致变质剂失效,可在凝固过程中有效发挥异质形核作用^[32]。预处理阶段,先依据D2钢成分标准计算各原料配比,随后将配好的原料按“铁合金→碳块→孕育剂(仅复合组与单一孕育剂组添加,添加量为0.2%)”的顺序分层置于熔炼炉坩埚内备用。

熔炼加热过程采用科学的分段式升温制度:低温预热段(室温至 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$)主要作用是去除原料表面吸附水及油污,避免熔炼过程中产生气体杂质;中温升温段($800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)用于实现铁合金的初步熔化,为后续成分均匀化奠定基础;高温熔炼段($1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $1\ 450\text{ }^{\circ}\text{C}$)确保原料完全熔化。该升温方式在保障最终浇注温度($1\ 450\text{ }^{\circ}\text{C}$)一致性的同时,可避免因局部温差过大导致坩埚受热不均而产生开裂风险,

同时有效减少因温度梯度过大引发的早期凝固现象，保障钢液质量。钢液熔炼完成后，将其浇注至 $\Phi 80\text{ mm} \times 160\text{ mm}$ 圆柱体型腔铸型中，经自然冷却凝固后获得目标规格铸锭，D2钢铸锭各化学成分如表1所示。

表1 D2钢化学成分表
Tab. 1 Chemical composition table of the D2 steel
 $w_B/\%$

C	Cr	Mo	V	Mn	Si	P	S	Fe
1.5	11.8	0.8	0.8	0.5	0.48	0.02	0.02	余量

试验设计6组对比方案系统探究不同孕育工艺的影响：A组为对照组，采用传统重力铸造工艺，不添加孕育剂或隔片；B组为单一孕育剂组，在传统铸造基础上于型腔中添加硅钡孕育剂；C组为薄隔片孕育组，在型腔内置2.3 mm厚度的D2钢隔片；D组为薄规格复合孕育组，采用2.3 mm隔片与硅钡孕育剂协同作用；E组为厚隔片孕育组，在型腔内置3.2 mm厚度的D2钢隔片；F组为厚规格复合孕育组，以3.2 mm隔片结合硅钡孕育剂构建复合孕育体系。其中，隔片孕育工艺所用隔片成分与目标钢种完全一致，且兼具分隔型腔物理场（温度场、浓度场）与形核衬底的双重作用，物理场的分隔可抑制溶质原子的富集，隔片吸热降低熔体内部的温度梯度，可减少柱晶生长，从而实现晶粒细化与成分均匀化的双重调控；复合孕育工艺通过隔片与硅钡孕育剂的协同使用，实现物理分隔与化学孕育的同步优化。两类隔片宽度均为30 mm、长度150 mm，且长度略小于型腔高度，可确保隔片垂直固定，通过2.3 mm与3.2 mm的厚度差异，重点对比隔片尺寸对熔体分隔效果及形核效率的影响规律。

图1是铸锭中部横截面示意图，展示了凝固试验浇注的圆柱铸型中D2钢隔片放置位置，以及铸锭取样位置。使用电火花线切割设备在距铸件底部80 mm处的

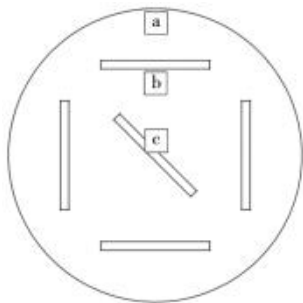


图1 钢片放置位置及铸锭取样位置示意图（铸锭中部横截面）
Fig. 1 Schematic diagram of sampling locations in the ingot and the steel sheet placement positions (Cross section of the middle part of the ingot)

纵向截面上截取试样，试样规格为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。完成试样切割后，通过热镶嵌机对样品进行镶嵌。对镶嵌完成的试样，采用梯度目数由低到高砂纸依次打磨，打磨完成后将试样置于抛光布上完成抛光处理。磨抛工序结束后进入腐蚀处理阶段，采用质量分数4%的硝酸酒精溶液对试样抛光面进行腐蚀，腐蚀时间控制在15~20 s，待腐蚀面出现雾状外观时，立即对试样进行清洗并烘干。后续开展金相观察与晶粒统计工作，使用VHK-600K型金相显微镜对试样进行组织观察，同时采用ImageJ软件对晶粒尺寸进行统计分析。最后进行SEM观察，采用德国ZEISS Sigma 300型扫描电子显微镜（SEM），以背散射（BSE）模式对铸件芯部组织开展观察。

2 试验结果与分析

2.1 不同处理方式对铸态组织的影响

图2展示了光学显微镜下不同工艺的铸件不同部位微观组织。A组：传统工艺得到的铸件；C组：2.3 mm隔片孕育工艺得到的铸件；E组：3.2 mm隔片孕育工艺得到的铸件。

图3展示了B组、D组和F组的铸件的不同部位微观组织。B组：只添加孕育剂得到的铸件；D组：2.3 mm复合孕育工艺得到的铸件；F组：3.2 mm复合孕育工艺得到的铸件。

试验观察结果如下：A、B组边缘区域金相图中可见典型树枝晶，但B组在添加孕育剂后在铸件的内部枝晶现象被抑制，而采用隔片孕育工艺的C、D、E和F组的铸件整体均出现明显树枝晶阻断现象，且二分之一半径处该现象更为显著，其中3.2 mm隔片孕育工艺的两组还形成了树枝晶与均匀晶粒的清晰分界线。此外，两组复合孕育工艺试样在边缘区域及二分之一半径处均实现了树枝晶消除。

芯部区域中，四组隔片孕育工艺的金相组织差异不大，但3.2 mm复合孕育工艺的F组表现突出：芯部晶粒细化效果最优，原本呈菊花团簇的共晶莱氏体网转变为条块、鱼骨状共晶碳化物，碳化物变厚变短且分布更均匀。

对比试验显示：仅添加孕育剂的B组晶粒整体粗大，边缘树枝晶未被消除；仅采用隔片孕育工艺的两组虽能阻断边缘树枝晶，但存在明显界限。金相观察结果与试验预期基本一致。

初步结论为：孕育剂可在D2钢凝固过程中阻断枝晶，但无法消除边缘早期形成的枝晶，且会使基体中共晶碳化物大于未使用孕育剂的A、C、E组；隔片孕

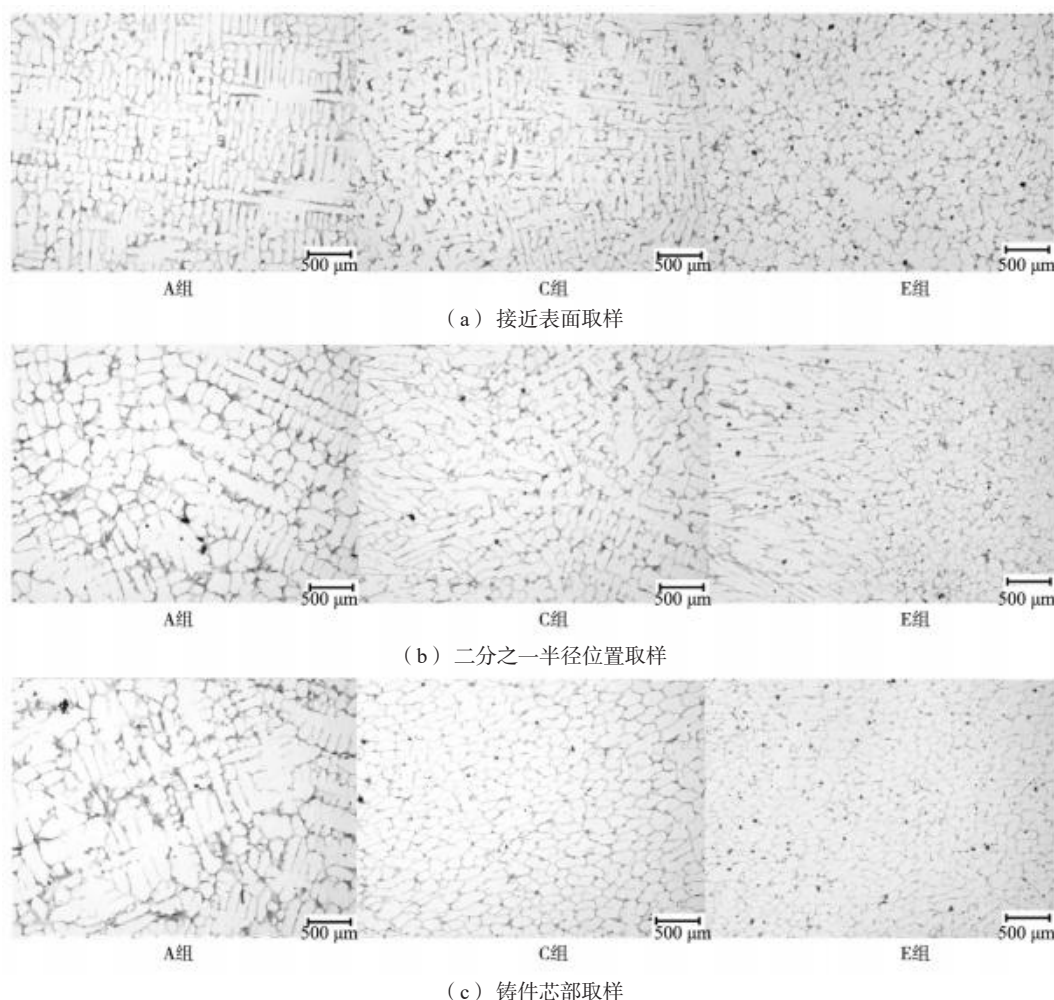


图2 不同隔片孕育工艺的铸件微观组织

Fig. 2 Microstructures of the castings prepared by different spacer inoculation processes

育工艺对边缘枝晶的阻断效果更显著；采用3.2 mm复合孕育工艺浇注，可大幅细化铸件芯部晶粒。

2.2 晶粒大小分析

使用ImageJ软件对图2和图3测量其各组晶粒尺寸并用Origin软件绘制得到图4。

由图4柱状图可知，6种方案的晶粒尺寸存在显著差异，其中芯部区域隔片孕育工艺对晶粒细化的效果尤为明显。

2.2.1 同组不同位置的晶粒尺寸变化趋势

各组晶粒尺寸变化（芯部→二分之一半径处→边缘）及特征：

A组（传统浇注工艺）：81.69 μm →74.80 μm →64.18 μm 。呈现连续递减趋势，符合传统铸造中冷却梯度主导的晶粒细化规律。

B组（只添加孕育剂）：51.59 μm →70.54 μm →61.45 μm 。中间区域出现显著粗化现象，较芯部粗化达36.7%，推测与孕育剂导致局部过冷度降低相关。

C组（2.3 mm隔片孕育）：65.65 μm →54.6 μm →44.57 μm 。晶粒尺寸呈均匀递减分布，芯部至边缘总细化幅度32.1%。

D组（2.3 mm复合孕育）：49.07 μm →44.07 μm →40.41 μm 。晶粒尺寸依旧均匀递减，芯部至边缘总细化幅度17.6%。

E组（3.2 mm隔片孕育）：33.94 μm →39.70 μm →38.43 μm 。芯部晶粒细化效果突出，中间区域仅表现为轻微粗化。

F组（3.2 mm复合孕育）：19.60 μm →36.09 μm →33.78 μm 。芯部晶粒细化效果极为显著，但中间区域粗化特征明显。

关键对比结论。隔片孕育工艺中隔片厚度的影响：相较于2.3 mm隔片孕育工艺（C组），3.2 mm隔片孕育工艺（E组）对芯部晶粒的细化作用更为显著，细化幅度提升明显，但同时易导致中间区域出现粗化现象。

隔片-孕育剂复合孕育工艺的优化效果：3.2 mm复

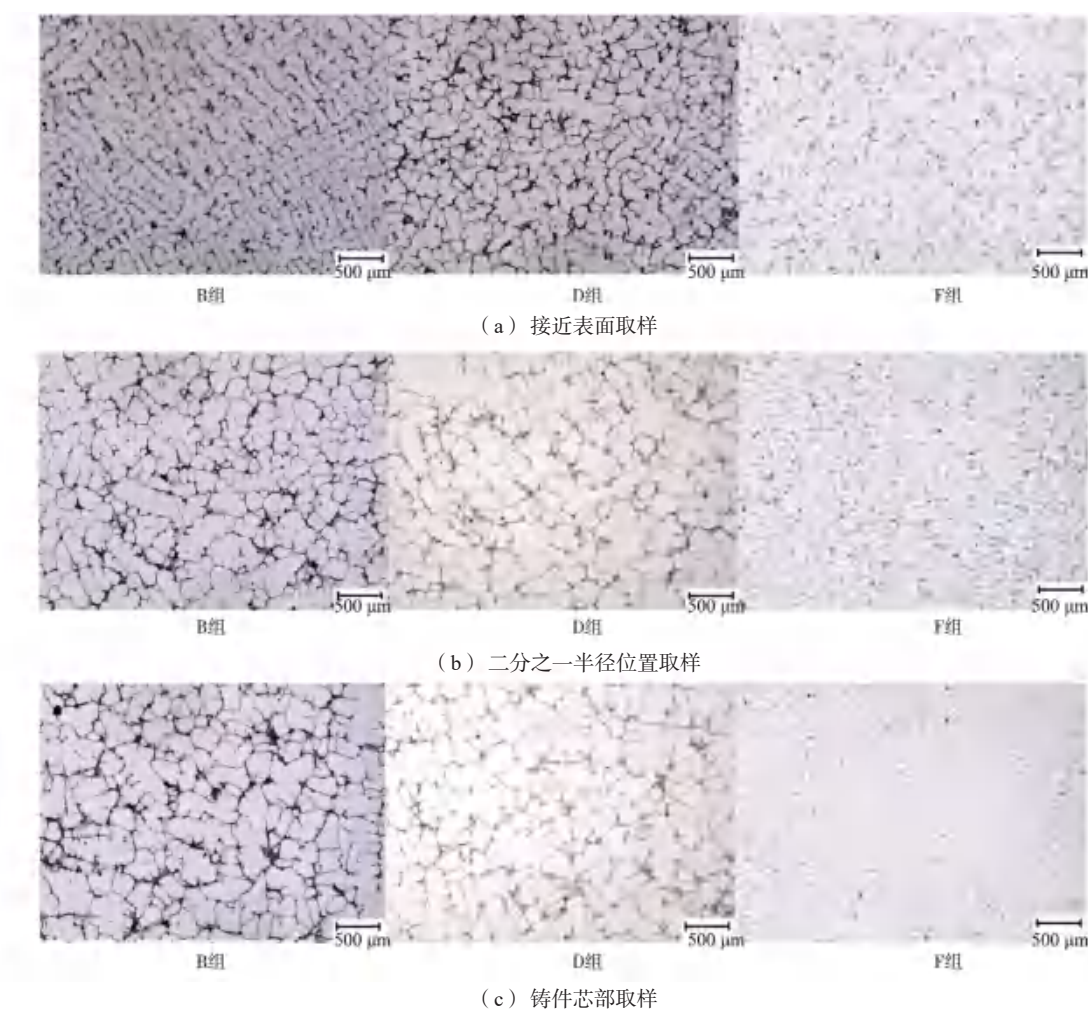


图3 不同隔片孕育工艺结合孕育剂的铸件微观组织

Fig. 3 Microstructures of the castings prepared by different spacer inoculation processes combining with inoculants

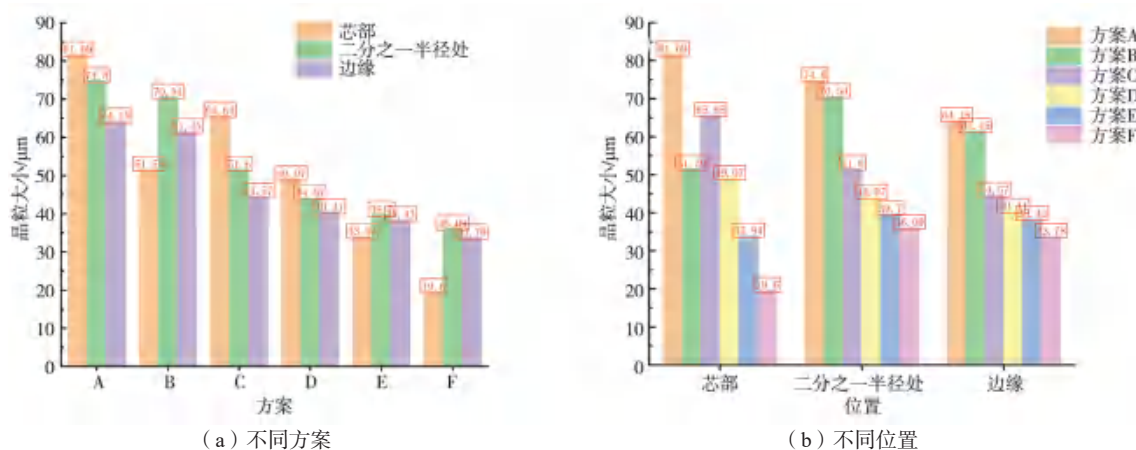


图4 不同工艺处理的铸件的晶粒尺寸

Fig. 4 Grain sizes of the castings treated by different processes

合孕育工艺 (F组) 的芯部晶粒细化效果在所有组别中最优, 充分体现了隔片孕育与孕育剂协同作用的优势。隔片孕育钢片的厚度参数对复合孕育工艺的整体细化效果具有重要影响, 是调控铸件晶粒分布的关键因素。

2.2.2 不同组同位置的晶粒尺寸对比

以传统工艺A组为对比基准, 分别测试铸件芯部、1/2半径处、边缘三大特征区域的晶粒尺寸, 定量分析单一孕育、隔片孕育、复合孕育及不同隔片厚度对晶粒细化效果的影响规律, 并完成多工艺细化效果排序

与综合分析。

2.2.2.1 各组晶粒细化效果

(1) 芯部区域

A组(传统工艺): 81.69 μm (基准值)。
 B组(仅添加孕育剂): 51.59 μm, 较基准细化达36.8%, 添加少量孕育剂能起到细化晶粒作用。
 C组(2.3 mm隔片孕育): 65.65 μm, 较基准值细化19.6%, 展现出隔片孕育工艺的基础细化作用。
 D组(2.3 mm复合孕育): 49.07 μm, 较基准值细化39.9%, 添加孕育剂后的隔片孕育工艺晶粒细化效果明显优于同厚度隔片孕育工艺。

E组(3.2 mm隔片孕育): 33.94 μm, 较基准值细化58.5%, 随隔片孕育工艺中隔片厚度增加, 芯部细化效果显著提升。

F组(3.2 mm复合孕育): 19.60 μm, 较基准值细化76.0%, 为所有组别中细化效果最优者。

(2) 二分之一半径处

A组(传统工艺): 74.8 μm (基准值)。
 B组(仅添加孕育剂): 70.54 μm, 较基准值细化5.7%, 仅添加孕育剂能起到细化晶粒作用, 不过效果不明显。

C组(2.3 mm 隔片孕育): 51.6 μm, 较基准值细化31.0%, 添加隔片后晶粒细化效果显著提高。

D组(2.3 mm复合孕育): 44.07 μm, 较基准值细化41.0%, 隔片配合孕育剂共同孕育后晶粒细化效果进一步提升。

E组(3.2 mm隔片孕育): 39.70 μm, 较基准值细化46.9%, 细化效果优于2.3 mm复合孕育工艺组。

F组(3.2 mm复合孕育): 36.09 μm, 较基准值细化51.8%, 得益于较厚的隔片孕育隔片, 有效抵消了异质孕育剂可能带来的负面影响, 晶粒细化效果最优。

(3) 边缘区域

A组(传统工艺): 64.18 μm (基准值)。
 B组(仅添加孕育剂): 61.45 μm, 较基准值细化4.3%, 因铸件边缘冷却速率过快, 孕育剂未能充分发挥作用, 只起到少许细化晶粒的作用。

C组(2.3 mm 隔片孕育): 44.57 μm, 较基准值细化33.6%, 添加隔片后晶粒细化效果明显提升。

D组(2.3 mm 复合孕育): 40.41 μm, 较基准值细化37.0%, 隔片配合孕育剂后细化效果和只添加隔片的工艺对晶粒细化的效果接近。

E组(3.2 mm隔片孕育): 38.43 μm, 较基准值细化40.1%, 该区域细化效果整体弱于芯部。

F组(3.2 mm复合孕育): 33.78 μm, 较基准值细化47.4%, 通过隔片与孕育剂的协同作用, 实现了边缘

区域的均匀细化, 厚隔片的细化效果优于相对较薄的隔片。

2.2.2.2 细化效果综合排序

芯部位置: F组(76.0%)>E组(58.5%)>D组(39.9%)>B组(36.8%)>C组(19.6%)。

边缘位置: F组(47.37%)>E组(40.1%)>D组(37.0%)>C组(33.6%)>B组(4.3%)。

核心结论: 3.2 mm 复合孕育工艺(F组)的综合细化效果最优, 不仅在芯部区域实现了极为显著的晶粒细化, 边缘区域的细化表现也优于其他各组, 达成了铸件全局晶粒的均匀优化。

2.3 不同孕育工艺铸件的 EDS 扫描

图5呈现了不同孕育工艺对铸件芯部组织碳元素含量的影响, 其中各组对应的工艺为2.3 mm隔片孕育(A组)、2.3 mm复合孕育(B组)、3.2 mm隔片孕育(C组)、3.2 mm复合孕育(D组)。从图5中可见, 四组铸件的网状碳化物偏析情况存在差异: A组网状碳化物面积较大, 但排列致密程度不及B、C组。整体来看, 采用2.3 mm D2钢隔片的两组(A、B组), 其碳元素偏析程度大于3.2 mm隔片组(C、D组), 同比最大增幅达1.8%。

表2列出了不同隔片孕育工艺芯部组织EDS扫描元素分布。结合EDS图可以看出其余元素偏析趋势与C偏析趋势基本一致, 其中差异最大的Cr偏析同比最大提高了4.76%。图6为不同隔片孕育工艺芯部组织各元素能谱分析。

表2 不同隔片孕育工艺芯部组织EDS扫描元素分布
 Tab. 2 EDS scanning element distributions in the core tissues under different spacer incubation processes
 w_B/%

方案	C	Cr	Mn	Mo	V
A	5.69	17.47	0.65	0.72	1.65
B	6.13	17.43	0.63	0.70	1.65
C	4.76	13.74	0.50	0.66	1.07
D	4.33	12.67	0.44	0.62	0.86

对比四种孕育工艺对铸件偏析的改善效果, 其优劣排序为: D组>C组>B组>A组。具体来看, B组虽实现了晶粒细化, 但因冷却速率与A组一致, 对偏析的改善作用极为有限, 可忽略不计。C组和D组的改善效果更为显著, 一方面, 二者对钢液的冷却效果优于A组、B组, 且隔片孕育钢片能阻挡凝固过程中合金元素随固液相界面向芯部推进的趋势; 另一方面, 隔片孕育工艺可通过增加形核点、分隔液相区域以改变熔体流动性, 进而减弱偏析形成、优化组织晶粒形貌。其中, D

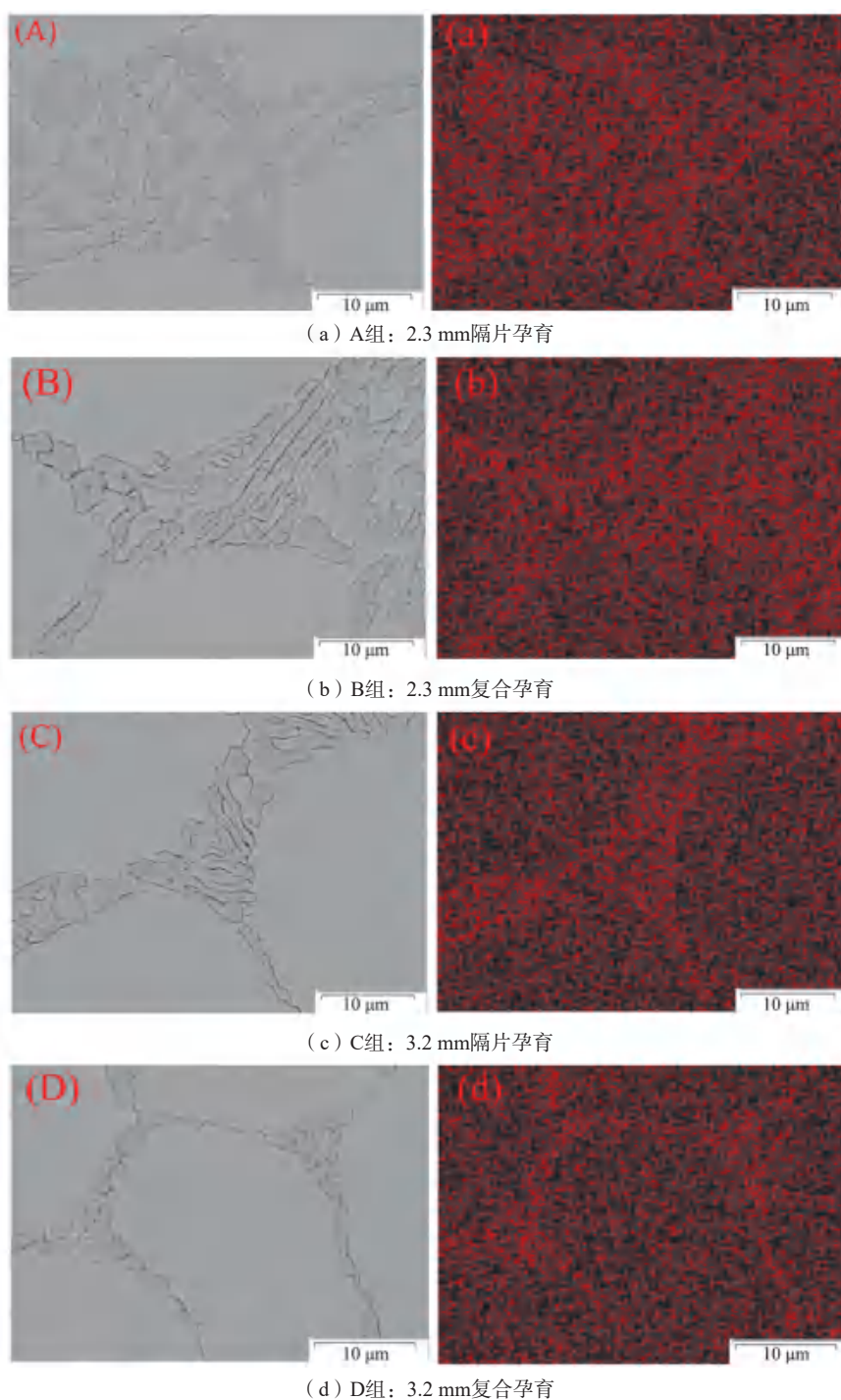


图5 不同隔片孕育工艺芯部组织碳元素EDS分析

Fig. 5 EDS analysis of the carbon elements in the core tissues under different spacer incubation processes

组采用的复合孕育工艺兼具两种孕育方式的优势，能提供更多形核点，因此对偏析的抑制效果最为突出。D工艺的Cr元素对比A、B组有明显降低，仅比目标值高5.6%，由于扫描目标是碳化物，所以C元素均比目标值高。而Mn、Mo、V等元素波动也均是D组较好。

2.4 碳化物的 EDS 扫描

通过观察图3我们可以发现金相图中存在着一些

细小黑点，其大小在各图中近似一致，但分布不同，选定不同组芯部对其进行EDS扫描并进行对比，如图7所示；成分分布如表3所示。碳波动范围：2.93~18.90（基准1.5），点4、6、7和8显著偏高。铬波动范围：9.42~45.16（基准12），点2、6极端偏高。推测为碳化铬如 M_7C_3 、 $M_{23}C_6$ 。钒（V）波动范围：0.37~5.80（基准0.8），点2、6显著偏高。通过对比点1、4、7、8、10和点6可以得出共晶莱氏体碳化物和黑色区域成分区

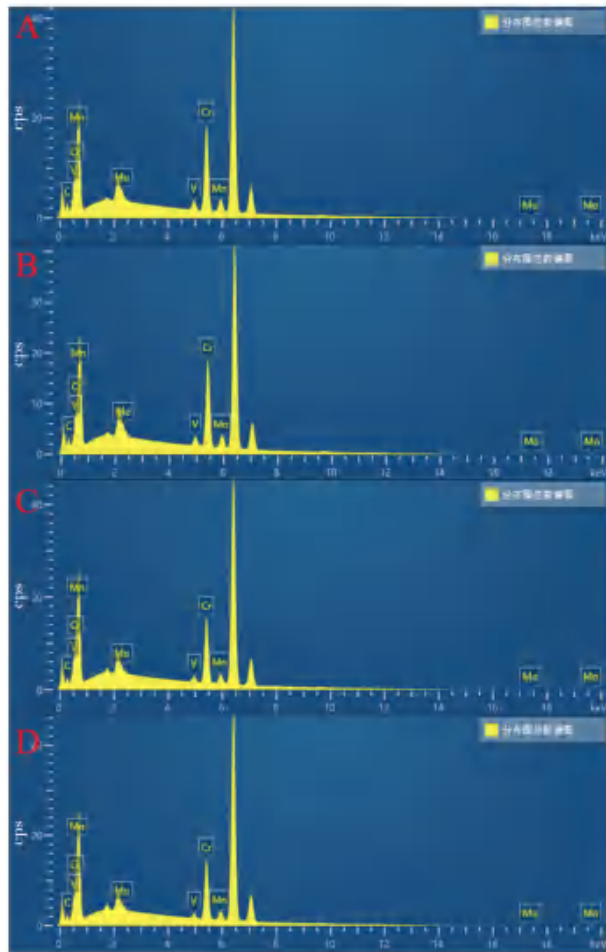


图6 不同隔片孕育工艺芯部组织各元素能谱分析

Fig. 6 Energy spectrum analysis of various elements in the core tissues under different spacer incubation processes

表3 芯部组织元素EDS点扫描分析结果
Tab. 3 EDS point scanning analysis results of the elements in the core microstructure $w_B/\%$

点	C	Cr	Mn	Mo	V
1	13.44	12.99	0.69	0.61	0.59
2	9.80	44.11	0.89	0.70	5.7
3	4.18	9.42	0.56	0.55	0.40
4	18.90	19.19	0.89	0.68	0.9
5	3.47	10.54	0.69	0.52	0.51
6	10.12	45.16	0.54	0.63	5.80
7	16.70	15.37	0.76	0.55	0.74
8	16.54	11.06	0.63	0.58	0.63
9	2.93	10.04	0.78	0.65	0.37
10	11.20	11.55	0.66	0.63	0.67

别。这两个部分均为偏析，但是偏析元素不同，黑色区域主要是C偏析较为严重，Cr则与基体部分区别不大；而共晶莱氏体碳化物则集中为Cr偏析，其占比甚至达到40%以上。

2.5 机理分析

没有进行孕育处理的铸件（A组）枝晶发达，铸件内部晶粒粗大。高合金铸件的凝固过程是溶质原子再分布的复杂过程，成分过冷和铸件本身的由外向内的不规则的温度场梯度分布导致形核晶粒的枝晶生长发达，并且由于铸件的增大，结晶潜热等不能及时导出导致内部形核晶粒有着足够的生长时间从而在凝固结



(a) B组芯部位置黑点区域

(b) D组晶界区域

(c) A组芯部位置黑点区域

图7 组织芯部元素EDS点扫描分析

Fig. 7 EDS point scan analysis of elements in the core region of the microstructure

束时变为粗大的晶粒。

仅孕育剂组（B组）由于添加了孕育剂，起到了一定的晶粒细化效果，不过孕育剂含量较少，浇注时的高温也会导致部分孕育剂的熔化，因此其细化效果有限。

隔片孕育组（C、E组）：D2钢隔片在凝固过程中

为钢液提供了稳定的形核核心，有效促进晶粒形核与细化。随着隔片厚度增加（3.2 mm），钢液过冷度及形核密度显著提升，晶粒细化效果得到进一步优化。

复合孕育组（D、F组）：该工艺形成了协同作用机制，隔片吸收了熔体的热量，降低了熔体的温度，使得铸件内部熔体中的孕育剂能够保留更长时间，增

强形核效果。隔片本身的形核作用和孕育剂的形核作用叠加实现全局细化效果的优化。其关键在于精准控制隔片孕育隔片厚度,合理的厚度参数可有效避免中间区域出现晶粒粗化,改善整体铸件组织。

内置隔片在凝固的过程中分隔了熔体区域,改变了溶质原子在凝固过程中分布特点;没有隔片的普通凝固的溶质原子一般形成由外向内随着液固界面的推进而向内部富集,从而会加大铸件内部的偏析,而隔片区域的阻隔会减少内部溶质原子在内部的富集;此外隔片在熔体中被熔化时会吸收大量热量,这在降低熔体内部温度增加变质剂的有效存在时间的同时,也降低铸件由外向里的温度梯度,这都是有利于抑制枝晶生长、有利于晶粒细化的等轴晶粒的形成。在这过程中铸件的偏析也随之改善。

参考文献:

- [1] Lim S H, Ryou K H, Jang K, et al. Hot cracking behavior of additively manufactured D2 steel [J]. *Materials Characterization*, 2021, 178: 111217.
- [2] 邱凌, 吴晓春. 国内外冷作模具钢发展概述 [J]. *模具制造*, 2017, 17 (11): 89-96.
- [3] Fukaura K, Yokoyama Y, Yokoi D, et al. Fatigue of cold work tool steels: effect of heat treatment and carbide morphology on fatigue crack formation, life, and fracture surface observations [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, 35 (4): 1289-1300.
- [4] Vallotton J, Herlach D M, Henein H, et al. Microstructural quantification of rapidly solidified undercooled D2 tool steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48: 4735-4743.
- [5] 魏代斌. 新型复合变质处理对铸造Cr12钢组织和性能的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [6] 郑东升, 刘丹, 罗登, 等. 回火温度对超高强度钢微观组织及力学性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2020, 41 (12): 90-96.
- [7] 廖德勇, 贾宏斌. 热处理工艺对Cr12模具钢组织与性能的影响 [J]. *鞍钢技术*, 2022 (3): 31-34.
- [8] 赵昌胜. 国内模具钢的选用及发展 [J]. *金属加工 (热加工)*, 2012 (3): 38-42.
- [9] Yang J, Zou D N, Li X M, et al. Effect of rare earth on microstructures and properties of high speed steel with high carbon content [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2007, 14: 47-52.
- [10] Huang Y, Cheng G, Li S, et al. Precipitation behavior of large primary carbides in cast H13 steel [J]. *Steel Research International*, 2019, 90: 1900035.
- [11] 刘松涛, 伦明睿, 陈炜, 等. 碲对Cr12MoV冷作模具钢加工性能的影响 [J]. *机械工程材料*, 2025, 49 (1): 38-43.
- [12] Liu J, Li W, Fu L. Effect of cooling rates on the characteristics

3 结论

(1) 树枝晶与晶粒细化: 隔片孕育工艺细化效果显著, 尤其芯部优化效果突出, 增厚隔片可进一步强化芯部细化作用, 且能有效阻断树枝晶生长; 复合孕育 (隔片+孕育剂) 综合性能最优, 3.2 mm复合孕育组整体细化效果最佳, 可消除粗大碳化物并使其分布均匀, 隔片主导芯部细化、孕育剂补充边缘形核。单一使用孕育剂的细化效果有限, 需与隔片孕育工艺配合使用。

(2) 隔片孕育能够促进均匀形核、阻碍合金元素扩散, 抑制C、Cr等元素产生偏析; 隔片厚度带来的影响十分明显, 3.2 mm隔片组的偏析控制效果优于2.3 mm组, 其中采用复合孕育的3.2 mm隔片组对Cr元素偏析的控制效果最佳。

of carbides during solidification of D2 cold-work die steel [J]. *Steel Research International*, 2022, 93: 2200137.

- [13] Li W M, Jiao S C, Tong W J, et al. An innovative method for calibrating local cooling rate in electros slag remelting of M42 high-speed steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2021, 28: 990-996.
- [14] 邹富康, 仲红刚, 李莉娟, 等. 冷却速率对ZG40CrNi2Mo大型铸件凝固组织及元素偏析的影响 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53 (15): 135-140.
- [15] 陈浩炜, 李吉航, 战东平. 冷作模具钢中碳化物控制技术的研究进展 [J]. *钢铁研究学报*, 2024, 36 (7): 827-843.
- [16] 叶慧丽, 王琼, 刘波, 等. 两种生产工艺对D2冷作模具钢组织的影响 [J]. *热加工工艺*, 2021, 50 (21): 50-53.
- [17] 滕伟玲, 王强丽, 袁晓洒, 等. 机械振动频率对搅拌铸造建筑用钢性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2021, 50 (19): 75-77, 82.
- [18] 李新亮. 电磁搅拌工艺对模具钢组织和性能的影响 [J]. *宽厚板*, 2019, 25 (6): 37-39.
- [19] Liu J, Li W, Xu W, et al. Evolution behavior and fracture criterion of carbides in D2 cold-work die steel during hot working process [J]. *Steel Research International*, 2024, 95: 2300207.
- [20] Liu Y X, Wang Z G, Hu X Q, et al. Effects of Y addition on carbide morphology and impact properties of D2 cold work die steel [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 33: 5040-5051.
- [21] Nishimura T, Kishimoto A. Casting defect analysis of carbon steel using sand casting experiments [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2023, 17: 2030-2037.
- [22] Tonkovič-Prijanovič M, Mrvar P, Burja J, et al. Study on dissolution of Ba-containing inoculant in ductile cast iron melt and nucleation of graphite [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2024, 18: 2985-2995.
- [23] Sangame B B, Reddy Y P. Investigation on effect of different

- types of inoculants on the solidification of ductile cast iron using thermal analysis [J]. *Multidisciplinary Modeling in Materials and Structures*, 2024, 20 (6) : 995–1012.
- [24] Bauer B, Mihalic P I, Petrič M, et al. Effect of Si and Ni addition on graphite morphology in heavy section spheroidal graphite iron parts [J]. *Materials Science Forum*, 2018, 925: 70–77.
- [25] Lekakh S N. Effect of nonmetallic inclusions on solidification of inoculated spheroidal graphite iron [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2019, 13: 47–57.
- [26] American Foundry Society. Metalcasting industry research [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2026, 20 (2) : 1340–1350.
- [27] Patel D M, Nanavati P K, Chug C M. Effect of Ca and Ba containing ferrosilicon inoculants on microstructure and tensile properties of IS-210 and IS-1862 cast irons [C]// National Conference on Emerging Trends in Engineering Technology and Management. Ahmedabad, 2013: 1–8.
- [28] Zhang Z, Wu M, Zhang H, et al. Solidification principle in large vertical steel casting under the EMS effect [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54: 1870–1885.
- [29] Wang Y, Guo Q, Ren N, et al. Experimental and simulation studies of layer casting on industrial-scale Al-4.5 wt pct Cu ingot: effect, defect, and optimization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 322: 118205.
- [30] Zhong H, Zhou L, Yuan H, et al. A homogenization technology for heavy ingots: hot-top pulsed magneto-oscillation [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2024, 55: 1083–1097.
- [31] Sun S, Cao D, Zhao L, et al. Study on the influence of layered casting process on the internal quality of large steel ingot [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2026, 20 (2) : 1–14.
- [32] 刘超锋, 纪莲清, 刘建秀. 孕育剂对灰铸铁件不同性能的影响 [J]. *铸造*, 2007 (10) : 1078–1081.