



Cr12MoV 模具钢连铸缺陷特征及碳化物控制工艺优化

周伟基¹, 伍思源², 李万明², 李旭阳¹, 孙久红¹, 路 辉¹, 曹景娣¹

(1 东北特殊钢集团股份有限公司, 大连 116105; 2 辽宁科技大学, 鞍山 114051)

摘 要: Cr12MoV 模具钢是一种典型的高碳高铬冷作模具钢, 由于钢中 C、Cr 含量较高, 连铸过程中易出现凝固末期偏析及富 Cr 共晶碳化物聚集, 从而导致表面裂纹和局部断裂等缺陷。以 Cr12MoV 模具钢连铸生产为背景, 结合现场宏观缺陷特征、裂纹区域显微组织及共晶碳化物分布情况, 分析了连铸坯裂纹与碳化物富集之间的关系, 并确定最佳工艺参数: 保护渣碱度 0.85、1 300 °C 黏度 0.05 Pa·s、熔点 990 °C; 结晶器宽面水流量 115 m³/h、窄面水流量 20 m³/h, 冷却水水温差 2.2~2.4 °C, 据此对保护渣及结晶器冷却制度进行了优化。已有工业验证结果表明, 优化后连铸产品探伤合格率达到 95%~97%, 中心疏松级别控制在 1.0~2.0 级, 共晶碳化物级别为 2.0~3.5 级, 整体质量已接近同规格模铸产品水平。研究结果可为高碳高铬模具钢连铸裂纹控制及碳化物调控提供参考。

关键词: Cr12MoV 模具钢; 连铸; 偏析; 碳化物; 表面裂纹

DOI:10.20057/j.1003-8620.N260071

中图分类号: TF03

Defect Characteristics and Process Optimization for Carbide Control in Continuous Casting of Cr12MoV Die Steel

Zhou Weiji¹, Wu Siyuan², Li Wanming², Li Xuyang¹, Sun Jiuhong¹, Lu Hui¹, Cao Jingdi¹

(1 Dongbei Special Steel Group Co., Ltd., Dalian 116105, China;

2 University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: Cr12MoV die steel is a typical high-carbon, high-chromium cold-work die steel. Due to its high carbon and chromium content, segregation during the late stages of solidification and the aggregation of eutectic chromium carbides are prone to occur during continuous casting, leading to defects such as surface cracks and localized fractures. Against the backdrop of Cr12MoV Die Steel continuous casting production, and based on the macroscopic defect characteristics observed on-site, the microstructure of the crack zones, and the distribution of eutectic carbides, the relationship between cracks in continuous casting billets and carbide enrichment was analyzed. Optimal process parameters were determined as follows: mold flux basicity of 0.85, viscosity of 0.05 Pa·s at 1 300 °C, and melting point of 990 °C; water flow rate of the mold wide face at 115 m³/h, water flow rate of the narrow face at 20 m³/h, and a cooling water temperature difference of 2.2-2.4 °C. Based on these findings, the mold flux and mold cooling regimes were optimized. Existing industrial validation results indicate that, following optimization, the non-destructive testing pass rate for continuous casting products reached 95%-97%, with the center porosity grade controlled at 1.0-2.0 and the eutectic carbide grade at 2.0-3.5. Overall quality has approached the level of mold-cast products of the same specification. These research findings provide a reference for crack control and carbide regulation in the continuous casting of high-carbon, high-chromium die steels.

Key Words : Cr12MoV Die Steel; Continuous Casting; Segregation; Carbide; Surface Cracks

Cr12MoV 模具钢是一种典型的高碳高铬冷作模具钢, 具有高硬度、高耐磨性和良好的淬透性, 广泛应用于冲裁模、剪切模和冷成形模具等领域^[1]。随着特殊钢生产向高效化和短流程方向发展, 连铸工艺由于其生产效率高、成材率高等优点, 在模具钢生产中的应用逐渐增多^[2]。然而, 与普通中低碳钢相比, Cr12MoV 钢中 C、Cr 等元素含量较高, 凝固温度区间较宽, 在凝固末期更容易出现枝晶间偏析

并形成富铬共晶碳化物, 导致铸坯组织不均匀, 增加裂纹形成倾向^[3-5]。因此, 碳化物控制及裂纹抑制是 Cr12MoV 连铸生产中的关键问题。

已有研究表明, 高碳高铬冷作模具钢在凝固过程中对冷却条件较为敏感, 冷却速率变化会直接影响共晶碳化物的形貌、尺寸和分布状态^[6-7]。Man 等^[8]的研究发现, D2 冷作模具钢连铸过程中存在明显的凝固偏析现象, 且共晶碳化物由铸坯边部向中

基金项目: 国家自然科学基金(52374338): 酸性渣电渣重熔金钢线母线钢过程的夹杂物调控机理

作者简介: 周伟基(1974—), 男, 硕士, 正高级工程师;

E-mail: zhouwj202111@163.com;

收稿日期: 2026-05-19

通信作者: 孙久红(1966—), 男, 硕士, 正高级工程师;

E-mail: sunjiuhong@dtsteel.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

心区域逐渐粗化。Feng 等^[9]指出凝固过程中偏析与共晶碳化物演化往往同时发生,若碳化物在局部呈链状、网状或近连续分布,则会削弱材料的塑性,并给后续热加工和服役过程埋下裂纹隐患。Wu 等^[10-11]对 Cr12MoV 模具钢连铸过程研究发现,冷却速度和应变条件会直接影响角裂缺陷形成。Liu 等^[12]的研究表明 D2 钢中的碳化物在热加工过程中会发生断裂和演化,并改变局部变形协调能力。除组织因素外,保护渣性能和结晶器冷却条件对铸坯表面质量也具有重要影响。文光华等^[13-14]认为,保护渣行为、结晶器传热以及冷却均匀性对初生壳生长状态和表面质量有直接影响。史伟宁^[15]的研究表明结晶器内渣膜的形成、界面热阻、导热和辐射传热特征会共同影响热流分布和坯壳均匀生长,保护渣设计需要与具体钢种特性和工艺条件相匹配。Mills 等^[16]指出护渣的润滑和传热行为对铸坯表面质量具有重要作用。Won 等^[17]认为,热应力集中是连铸裂纹形成的重要原因之一。当保护渣渣膜不稳定、液面波动较大或结晶器冷却不均匀时,容易造成局部壳厚不均和热应力集中,从而诱发表面纵裂和角裂等缺陷^[18-19]。目前,关于高碳高铬模具钢的研究主要集中于碳化物演化规律、裂纹形成机理及工艺参数优化等方面,但针对现场裂纹缺陷与碳化物富集关系的研究相对较少,特别是缺少结合实际生产条件,对裂纹区域组织特征及工艺优化效果进行分析的研究。东北特殊钢集团股份有限公司 Cr12MoV 模具钢连铸生产过程中,铸坯存在表面纵裂、角部开裂及局部断裂等缺陷,连铸成品中还存在共晶碳化物偏聚及组织不均匀等问题。

针对上述问题,本研究以 Cr12MoV 模具钢连铸生产为背景,结合现场宏观缺陷照片、裂纹区域显微组织、保护渣优化前后表面质量对比、冷却不均导致的纵裂缺陷以及模铸与连铸成品共晶碳化物对比结果,分析 Cr12MoV 模具钢连铸坯裂纹与碳化物富集之间的关系。在此基础上,围绕保护渣优化和结晶器冷却制度调整两方面开展工艺优化研究,分析工艺参数变化对铸坯表面质量和共晶碳化物分布的影响,并结合工业验证结果评价优化效果,

为高碳高铬模具钢连铸过程中裂纹控制和碳化物控制提供参考。

1 工艺流程及化学成分

为降低生产成本,采用合金熔炼炉熔融的合金水与转炉钢水互兑的工艺流生产,即采用:合金熔炼炉化合金水与转炉钢水互兑→LF→RH/VD→连铸板坯,板坯的尺寸规格为 200 mm×(630~830)mm×5 800 mm(厚度×宽度×定尺长度)

Cr12MoV 模具钢主要成分控制要求见表 1。

2 Cr12MoV 模具钢缺陷表征与碳化物问题分析

2.1 铸坯表面裂纹与断裂的宏观特征

连铸坯表面纵裂纹的形成与钢种成分、结晶器传热、二次冷却制度、液面波动及矫直过程等多种因素有关^[17]。现场宏观观察结果表明,Cr12MoV 连铸坯在生产过程中主要出现表面纵裂、角部开裂及局部断裂等缺陷。缺陷多分布于铸坯边角部位,并在二次冷却、矫直及热装转运过程中进一步扩展。由图 1 可见,部分裂纹沿铸坯纵向延伸,裂纹区域表面存在开口及局部剥离现象,说明该类缺陷与铸坯凝固及冷却过程中的局部应力集中有关。对于 Cr12MoV 这类高碳高铬钢来说,由于钢中 C、Cr 含量较高,凝固末期易产生枝晶间偏析,并形成富 Cr 共晶碳化物。该类组织不均匀性会降低局部塑性,使铸坯在冷却收缩、矫直变形和转运扰动过程中产生裂纹。同时,若结晶器传热不均或初生坯壳厚度存在波动,局部区域承载能力下降,也会增加表面裂纹和角部开裂的形成倾向。因此,Cr12MoV 连铸坯宏观裂纹缺陷的形成与钢种凝固特性及连铸过程控制条件密切相关。由于宏观裂纹缺陷与铸坯凝固组织存在相关性,因此有必要进一步对裂纹区域显微组织及碳化物分布特征进行分析,以明确裂纹形成与组织变化之间的关系。

2.2 裂纹区的显微组织特征

裂纹敏感区域的显微组织进一步表明宏观缺陷的形成并非单纯的表面成形问题,而与局部组织脆化密切相关^[20]。为分析裂纹形成与组织状态之

表 1 Cr12MoV 主要化学成分及控制(质量分数)
Table 1 Main chemical composition and control limits of Cr12MoV

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Cu	Ni
标准	1.45~1.70	≤0.40	≤0.60	≤0.030	≤0.015	11.00~12.50	0.40~0.60	0.15~0.30	—	—
控制	1.47~1.55	0.30~0.40	0.20~0.40	≤0.020	≤0.003	11.10~11.50	0.45~0.50	0.16~0.20	≤0.20	≤0.25



图1 Cr12MoV 连铸坯表面裂纹与断裂的宏观形貌:(a)表面裂纹, (b)断裂的宏观形貌

Fig. 1 Macromorphology of surface cracks and fractures on Cr12MoV continuous casting billets : (a) surface cracks, (b) macroscopic morphology of the fractures

间的关系,对连铸坯表面裂纹区域、角部开裂区域及相邻无明显裂纹区域进行了取样分析。试样沿垂直于裂纹扩展方向截取,经磨制、抛光及腐蚀后进行金相观察,并采用SEM对裂纹区域显微组织进行分析。图2为裂纹区域显微组织形貌。由图可见,裂纹附近存在明显亮白色碳化物,部分区域碳化物呈链状及连续分布,且裂纹扩展路径与碳化物聚集区域基本一致。裂纹尖端附近存在明显碳化物偏聚现象。结合Cr12MoV钢成分特点及已有研究结果可知,该类亮白色组织主要为富Cr共晶碳化物。Cr12MoV钢中C、Cr元素含量较高,在凝固末期枝晶间区域易发生溶质富集,并形成共晶碳化物。当碳化物尺寸较大或局部连续分布时,会降低局部组织塑性,并在后续冷却及矫直过程中形成裂纹源。裂纹主要位于成品扁钢表面距角部30~50 mm区域,并沿轧制方向呈斜裂纹分布。SEM结果表明,裂纹区域碳化物聚集程度高于无明显裂纹区域,说明碳化物偏聚与裂纹形成具有相关性。

Cr12MoV连铸坯裂纹形成与碳化物偏聚、结晶器传热及冷却条件密切相关。因此,需要从保护渣行为及结晶器冷却制度等方面对连铸工艺进行优化,以改善初生坯壳生长条件并降低裂纹形成倾向。

3 工艺优化与过程控制

3.1 专用保护渣优化

保护渣性能会直接影响结晶器润滑状态、界面传热及初生坯壳生长条件。对于Cr12MoV这类高碳高铬模具钢而言,由于钢液凝固温度区间较宽,且表面裂纹敏感性较高,保护渣参数匹配不合理时,易造成渣膜不稳定、局部润滑不足及热流分布不均,从而诱发表面纵裂和角部开裂等缺陷。结合现场生产情况,对Cr12MoV连铸用保护渣参数进行了调整。表2为优化前后保护渣关键参数。优化后,保护渣碱度由1.02调整至0.85,1300℃下黏度由0.10 Pa·s降低至0.05 Pa·s,熔点由1000℃调整

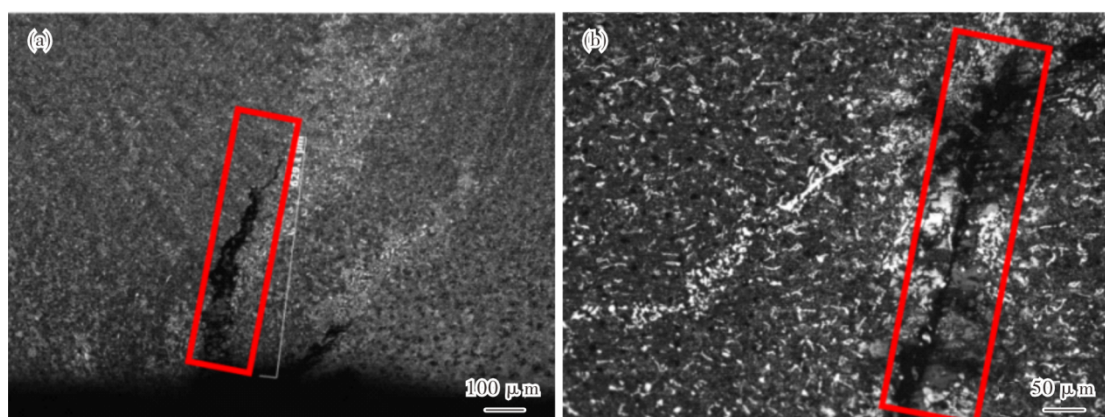


图2 Cr12MoV 连铸坯裂纹区显微组织及碳化物富集特征:(a)裂纹区显微组织, (b)裂纹区碳化物富集特征

Fig. 2 Microstructure and carbide enrichment characteristics of the crack zone in Cr12MoV continuous casting billets : (a) microstructure of the crack zone. (b) characteristics of carbide enrichment in the crack zone

至 990 ℃。参数调整后,保护渣流动性及铺展性能得到改善,有利于稳定结晶器内渣膜形成及传热过程。图 3 为保护渣优化前后铸坯表面质量对比结果。优化前,铸坯表面存在较明显的纵裂及局部缺陷;优化后,表面裂纹数量减少,铸坯表面质量得到改善。

表 2 优化前后保护渣关键参数

Table 2 Key parameters of mold flux before and after optimization

工艺	渣碱度	黏度(1300 ℃)/ (Pa·s)	熔点/℃
优化前	1.02	0.10	1 000
优化后	0.85	0.05	990

结果表明,保护渣参数优化后,结晶器内润滑和传热条件得到改善,初生坯壳生长均匀性提高,从而降低了表面裂纹形成倾向。但现场生产过程中仍存在局部纵裂缺陷,说明除保护渣因素外,结晶器冷却条件对裂纹形成同样具有重要影响。因此,有必要进一步对结晶器冷却制度进行优化。

3.2 结晶器冷却均匀化

结晶器冷却条件会影响初生坯壳厚度及铸坯表面温度分布^[21]。对于 Cr12MoV 高碳高铬模具钢,由于其高温塑性较低,若结晶器各区域冷却强度差异较大,易造成局部壳厚不均,并在后续矫直和冷却过程中形成裂纹。图 4 为现场纵裂缺陷形貌。由图可见,裂纹沿铸坯纵向扩展,局部区域存在明显开裂现象。分析认为,结晶器局部传热不均会导致初生坯壳厚度波动,当薄弱区域受到热应力及矫直应力作用时,易形成纵裂缺陷。针对上述问题,对结晶器冷却制度进行了调整。表 3 为优化前后结晶

器冷却参数变化。优化后,宽面水流量由 130 m³/h 调整至 115 m³/h,窄面水流量由 30 m³/h 调整至 20 m³/h,水温差由 2.8~3.0 ℃降低至 2.2~2.4 ℃。通过调整宽面与窄面冷却水分配,减小了不同区域之间的冷却差异,有利于提高初生坯壳生长均匀性。

冷却制度优化后,铸坯表面纵裂和角部开裂缺陷数量减少。结果表明,适当降低局部冷却强度并改善结晶器冷却均匀性,可减小局部热应力集中,从而降低裂纹形成倾向。在完成保护渣及结晶器冷却制度优化后,为评价工艺调整对 Cr12MoV 连铸产品质量的影响,对优化后产品组织及质量指标进行了工业验证。

4 工业验证与质量评价

4.1 质量指标验证

结合现有工业验证结果,可将探伤合格率、中心疏松级别和共晶碳化物级别作为评价 Cr12MoV 连铸质量的指标^[22]。为评价工艺优化后 Cr12MoV 连铸产品质量,对探伤合格率、中心疏松级别及共晶碳化物级别进行了统计分析。上述指标分别用于评价产品内部缺陷控制情况、铸坯中心致密性及组织均匀性。表 4 为工艺优化后 Cr12MoV 连铸产品主要质量指标。结果表明,优化后产品探伤合格率达到 95%~97%,中心疏松级别控制在 1.0~2.0 级,共晶碳化物级别为 2.0~3.5 级。按照 GB/T 14979—1994 标准,在扁钢截面宽度 1/4 处及厚度 1/4 处取样,对共晶碳化物不均匀度进行评级。结果显示,优化后连铸产品共晶碳化物分布得到改善,产品质量接近同规格模铸产品水平。探伤结果表明,铸坯内部裂纹及疏松缺陷得到控制,中心疏松级别降低说明凝固末期中心区域致密性得到改善,共晶碳化



图 3 保护渣优化前后铸坯表面质量对比:(a)保护渣优化前铸坯表面质量,(b)保护渣优化后铸坯表面质量

Fig. 3 Comparison of the surface quality of the casting billet before and after mold flux optimization : (a) surface quality of casting billet before mold flux optimization , (b) surface quality of the casting billet after mold flux optimization

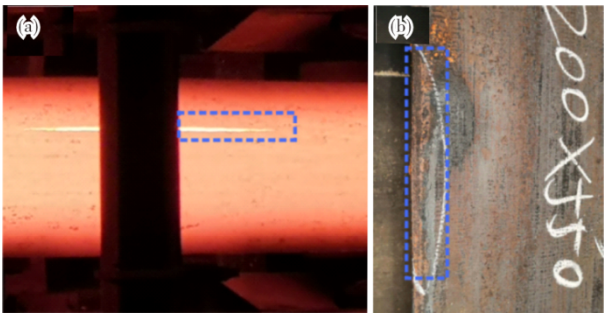


图4 冷却不均导致的纵裂缺陷:(a)热坯纵裂纹,(b)冷坯纵裂纹

Fig. 4 Longitudinal cracking defects caused by uneven cooling : (a) hot billet with longitudinal crack , (b) cold billet with longitudinal crack

表3 优化前后的结晶器冷却制度

Table 3 Mold cooling regime before and after optimization

冷却制度	结晶器水流量/(m ³ ·h ⁻¹)		水温差/℃
	宽面	窄面	
优化前	130	30	2.8~3.0
优化后	115	20	2.2~2.4

物级别降低表明碳化物偏聚现象有所减轻。综合结果表明,保护渣优化及结晶器冷却制度调整后,Cr12MoV 连铸产品内部质量及组织状态均得到改善。

4.2 模铸与连铸成品共晶碳化物对比

除质量指标外,共晶碳化物形貌及分布状态也是评价高碳高铬模具钢组织质量的重要依据。因此,对模铸与连铸产品共晶碳化物形貌进行了进一步对比分析。图5为未优化Cr12MoV连铸成品共晶碳化物形貌。由图可见,亮白色碳化物在基体中呈条带状和流线状分布,局部区域存在链状连接现象,组织方向性较明显。碳化物形貌以长条状、短棒状及块状为主,部分区域存在连续分布现象。该结果表明,连铸凝固过程中枝晶间偏析较明显,富Cr共晶碳化物在局部区域发生聚集。粗大及连续分布的共晶碳化物会降低组织均匀性,并在后续冷却、矫直及热装过程中形成应力集中区域,从而增加裂纹形成倾向。因此,共晶碳化物的尺寸及分布

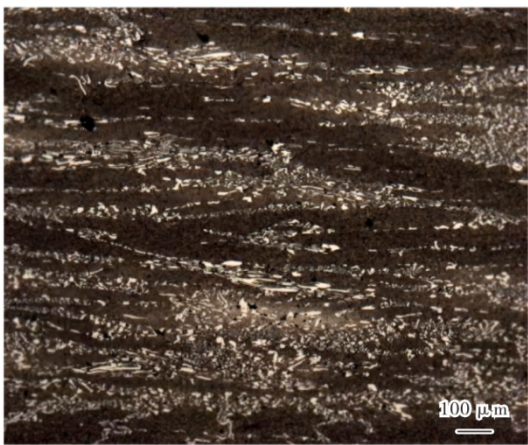


图5 未优化Cr12MoV连铸成品共晶碳化物

Fig. 5 Eutectic carbide in unoptimized Cr12MoV continuous casting finished product

状态是评价 Cr12MoV 连铸产品组织质量的重要指标。

图6为Cr12MoV模具钢模铸与连铸成品共晶碳化物对比结果。与未优化连铸产品相比,优化后连铸成品中共晶碳化物尺寸减小,连续分布现象减少,局部聚集程度降低,组织均匀性得到改善。模铸与连铸样品均取自同钢号产品,并尽量保持取样位置及后续状态一致,以减小取样差异对组织对比结果的影响。保护渣优化及结晶器冷却制度调整后,Cr12MoV连铸产品中共晶碳化物分布状态得到改善,连铸产品组织质量接近同规格模铸产品水平。在组织状态得到改善的基础上,还需进一步结合现场生产情况,对优化后产品表面质量及热装状态进行验证。

4.3 优化后产品外观与热装状态

图7为工艺优化后Cr12MoV连铸产品外观及热装状态。由图可见,优化后铸坯表面未见明显纵裂、角裂及局部断裂等缺陷,铸坯边角部位完整,表面质量较优化前得到改善。热装过程中,铸坯运行状态正常,未出现因表面裂纹扩展导致的局部开裂及掉角现象,表明优化后铸坯能够满足热装生产要求。结合前述组织分析结果可知,保护渣优化及结晶器冷却制度调整后,铸坯初生坯

表4 工艺优化后Cr12MoV连铸产品的主要质量指标

Table 4 Main quality indicators of Cr12MoV continuous casting products after process optimization

评价指标	优化后连铸结果	对比基准	评价
探伤合格率/%	95 ~ 97	与模铸产品持平	内部缺陷得到控制
中心疏松级别/级	1.0 ~ 2.0	接近模铸水平,优于 GB/T 1299—2025 标准水平	中心致密性较好
共晶碳化物级别/级	2.0 ~ 3.5	接近同规格模铸产品质量,满足 GB/T 1299—2025 标准水平	满足标准要求

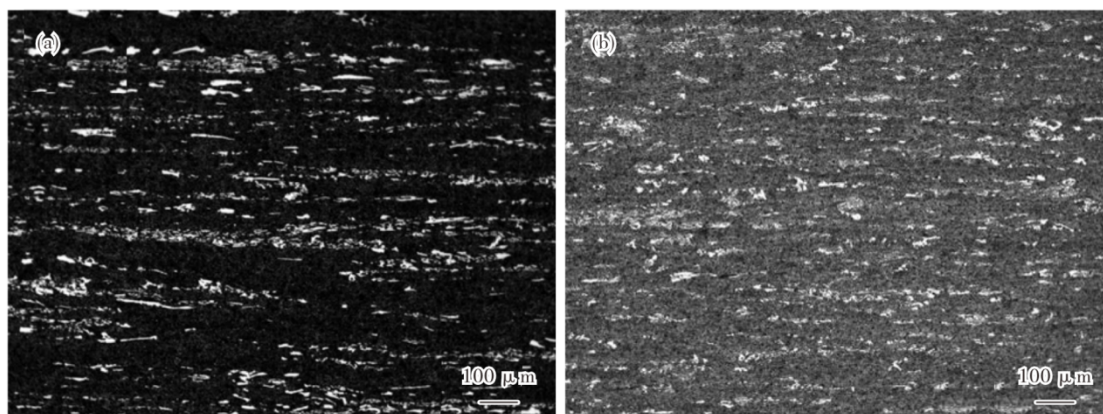


图6 Cr12MoV 模铸与连铸成品共晶碳化物对比:(a)模铸,(b)连铸

Fig. 6 Comparison of eutectic carbides in Cr12MoV products produced by mold casting and continuous casting : (a) mold casting, (b) continuous casting

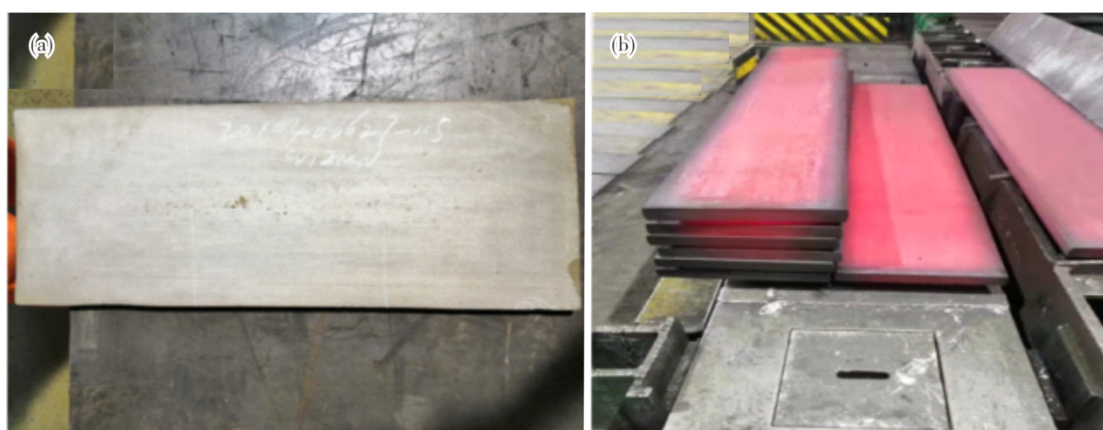


图7 优化后产品外观与热装状态图:(a)铸坯低倍,(b)热装轧材

Fig. 7 Product appearance and hot-charging condition after optimization : (a) Low-magnification view of the casting billet, (b) hot-charged rolled. steel

壳生长条件得到改善,局部冷却不均及应力集中现象减弱,从而降低了表面裂纹形成倾向。工业生产结果表明,工艺优化后 Cr12MoV 连铸产品表面质量及热装过程运行状态得到改善,可满足后续轧制生产要求。

5 结论

综合现场缺陷分析、工艺优化及工业验证结果,可得到如下结论:

1) Cr12MoV 连铸坯裂纹区域存在明显富 Cr 共晶碳化物偏聚现象。裂纹附近碳化物尺寸较大,部分区域呈链状及连续分布,裂纹扩展路径与碳化物聚集区域基本一致。凝固末期枝晶间偏析及共晶碳化物聚集是裂纹形成的重要原因。

2) 保护渣参数优化后,结晶器润滑及传热条件

得到改善,铸坯表面裂纹数量减少。优化后保护渣碱度由 1.02 调整至 0.85, 1 300 °C 黏度由 0.10 Pa·s 降低至 0.05 Pa·s,熔点由 1 000 °C 调整至 990 °C,有利于稳定渣膜形成及初生坯壳生长。

3) 结晶器冷却制度调整后,宽面与窄面之间冷却差异减小,初生坯壳生长均匀性得到改善。优化后宽面水流量由 130 m³/h 调整至 115 m³/h,窄面水流量由 30 m³/h 调整至 20 m³/h,水温差由 2.8~3.0 °C 降低至 2.2~2.4 °C,铸坯表面纵裂及角部开裂缺陷数量减少。

4) 工业验证结果表明,工艺优化后 Cr12MoV 连铸产品探伤合格率达到 95%~97%,中心疏松级别控制在 1.0~2.0 级,共晶碳化物级别为 2.0~3.5 级,产品质量接近同规格模铸产品水平。

参考文献

- [1] 李 晶. 特殊钢中碳化物控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019: 43.
- [2] 朱喜达, 陆家生, 赵勇智, 等. 冷作模具钢(Cr12MoV)短流程生产工艺实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 10-13.
- [3] 赵 明, 庞于思, 戴宇恒, 等. Cr12MoV 扁钢直接轧制过程中碳化物的控制与工艺优化[J]. 特殊钢, 2025, 46(3): 112-116.
- [4] 伦明睿, 沈 平, 刘 斌, 等. Cr12MoV 钢铸坯夹杂物及碳化物解析[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(5): 158-166.
- [5] Zhang W B, Gu Z W, Yang H Y, et al. Research progress on strengthening mechanisms and application of high-performance cold-work tool and die steels[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 41: 4265-4305.
- [6] 杜思敏, 李 雄, 林发驹. 热处理工艺对 Cr12MoV 钢组织及硬度的影响[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(3): 148-154.
- [7] Liu J C, Li W M, Fu L. Effect of cooling rates on the characteristics of carbides during solidification of D2 cold-work die steel[J]. Steel Research International, 2022, 93(9): 2270091.
- [8] Man T H, Dai Y H, Yao J, et al. Segregation and carbide evolution in AISI D2 tool steel produced by curved continuous casting [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 8254-8262.
- [9] Feng Q, Zeng Y N, Li J G, et al. Effect of carbides on thermoplastic and crack initiation and expansion of high-carbon chromium-bearing steel castings[J]. Metals, 2024, 14(3): 335.
- [10] Wu G R, Chen T C, Chen H Y, et al. The crack control strategy is influenced by the continuous casting process of Cr12MoV steel [J]. Steel Research International, 2024, 95(9): 2400101.
- [11] 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.
- [12] Liu J C, Li W M, Xu W D, 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: 2470012.
- [13] 文光华, 杨昌霖, 唐 萍. 连铸结晶器内渣膜形成及传热的研究现状[J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 12-21.
- [14] 文光华, 陈富杭, 蒋文波, 等. 连铸结晶器“自适应保护渣”理论及应用[J]. 工程科学学报, 2022, 44(9): 1558-1565.
- [15] 史伟宁. 连铸结晶器水量对 40Cr 钢方坯表面裂纹的影响[J]. 连铸, 2023(2): 84-89+105.
- [16] Mills K C, Fox A B. The Role of Mould Fluxes in Continuous Casting—So Simple Yet So Complex [J]. ISIJ International, 2003, 43(10): 1479-1486.
- [17] Won Y M, Yeo T J, Seol D J, et al. A New Criterion for Internal Crack Formation in Continuously Cast Steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31(4): 779-794.
- [18] 王博腾, 王 敏, 邢立东, 等. 亚包晶钢连铸坯裂纹漏钢形成机理及控制研究进展[J]. 连铸, 2025, 44(5): 18-27.
- [19] 何 航, 王子超, 曾 杰, 等. 连铸坯表面纵裂纹的形成与控制研究现状[J]. 连铸, 2024(2): 1-7.
- [20] 张贺君, 王亚栋, 符志祥, 等. 不锈钢连铸板坯宽面边部纵裂纹的形成机理[J]. 钢铁, 2025, 60(6): 113-120.
- [21] 陈振文, 彭霞林, 唐 伟, 等. 板坯连铸生产实践分析与工艺控制[J]. 连铸, 2018, 43(5): 9-12.
- [22] 梁静召, 田 鹏, 吴雨晨, 等. 板坯连铸保护渣分钢种应用技术[J]. 连铸, 2020(5): 21-25.