研究与开发

基于热力学分析的35MnB钢TiN夹杂物控制与工艺优化

张磊
（凌源钢铁股份有限公司技术中心，辽宁 朝阳 122500）

摘要：为解决35MnB钢在制备中因残余Ti形成的TiN夹杂物过量析出，引发D类粗系非金属夹杂物超标的技术难题，开展了3炉200 mm×240 mm断面铸坯工业试制。采用JMatPro材料热力学软件计算钢液固/液相线温度，解析TiN夹杂物在固液两相区的析出动力学机制，阐明钛氮浓度积与夹杂物析出行为的内在关联。通过宏观低倍与光学显微镜等表征，针对性优化炼钢与轧钢工艺参数，系统探究工艺调整对钢水纯净度、显微组织演变及力学性能的影响规律。结果表明，将Ti含量精准调控在0.025%~0.030%、取消RH精炼复氮工序并将真空保持时间延长至15 min以上，可有效降低TiN夹杂物的析出量与尺寸，使D类粗系夹杂物等级满足技术协议≤1.0级的严苛要求。优化后试验钢的非金属夹杂物控制水平与末端淬透性稳定性显著提升，化学成分、低倍组织、热顶锻等核心技术指标均符合协议要求，相关试验数据及工艺经验为工程机械用高强度耐磨锰硼钢的夹杂物精准调控与工艺优化提供了重要的工程实践与理论参考。

关键词：35MnB钢；材料热力学模拟；TiN夹杂物；工艺优化
中图分类号：TG142 **文献标志码：**A **文章编号：**1006-4613(2026)03-0024-09
DOI：10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 03. 005

Control of TiN Inclusions and Process Optimization in 35MnB Steel Based on Thermodynamic Analysis

ZHANG Lei
(Technology Center, Lingyuan Iron and Steel Co., Ltd., Chaoyang 122500, Liaoning, China)

Abstract: To address the technical challenge of excessive TiN inclusions formed by residual Ti in 35MnB steel during preparation, which lead to excessive class D coarse-series non-metallic inclusions, three industrial trials were conducted on 200 mm × 240 mm section billets. The JMatPro thermodynamic software was used to calculate the solidus and liquidus temperatures of the molten steel, and the kinetics mechanism of TiN inclusion precipitation in the solid-liquid two-phase zone was analyzed to clarify the intrinsic relationship between the Ti-N solubility product and the inclusion precipitation behavior. Through macroscopic low-magnification and optical microscopy characterization, the steelmaking and rolling process parameters were optimized specifically, and the influence of process adjustments on the purity of molten steel, microstructure evolution, and mechanical properties was systematically investigated. The results showed that precisely controlling the Ti content within 0.025% to 0.030%, eliminating the RH refining nitrogenation process, and extending the vacuum holding time to more than 15 minutes could effectively reduce the amount and size of TiN inclusions, making the D-class coarse inclusions grade meet the strict requirement of ≤1.0 grade in the technical agreement. The control level of non-metallic inclusions and the stability of the

张磊，硕士，工程师，2018年毕业于辽宁科技大学材料科学与工程专业。E-mail：421166062@qq.com

end quenchability of the optimized test steel were significantly improved, and all core technical indicators such as chemical composition, low-magnification structure, and hot upset forging met the agreement requirements. The relevant test data and process experience provided engineering practice and theoretical reference for the precise control of inclusions and process optimization of high-strength wear-resistant MnB steel for construction machinery.

Key words: 35MnB steel; material thermodynamic simulation; TiN inclusions; process optimization

链轨节作为工程机械行走系统的核心承载部件,长期承受交变载荷、冲击磨损及复杂应力作用,对材料的强度、韧性、耐磨性及组织均匀性要求严苛[1]。35MnB钢兼具B细化晶粒、Mn提升淬透性的特性,成为链轨节制造的优选材料,但凌钢股份有限公司优特钢厂(以下简称"优特钢厂")前期生产中频繁出现TiN夹杂物超标问题,导致D类粗系夹杂物等级超过协议规定的1.0级,严重影响部件使用寿命和安全可靠性[2]。TiN夹杂物在钢液凝固过程中易形成硬脆相,割裂基体连续性,在受力时成为应力集中源,引发裂纹萌生与扩展[3],其尺寸大、数量多,严重影响钢的力学性能和服役安全性,制约了产品的稳定供货。因此,需通过工艺优化解决TiN夹杂物超标问题,实现35MnB钢的合格生产。

国内外学者围绕中碳锰硼钢的夹杂物控制已经开展了大量研究。彭光健等人[4]研究发现,通过将成品Ti含量(质量分数,以下同)控制在0.025%~0.032%,N含量控制在0.005%~0.006%,最终稳定控制Ti/N比例以满足使用要求。王贺明等人[5]通过系统性优化转炉炉后脱氧模式、RH精炼纯循环时间、钙后静吹工艺以及中包保护浇铸关键工艺,实现钢中N含量稳定控制在0.002 5%~0.003 0%,显著降低TiN类夹杂物数量密度。李国胜等人[6]采用BOF—LF—VD—CC流程系统研究35MnB钢中夹杂物演变规律,明确了脱氧产物与TiN复合析出机制,为夹杂物精准控制提供依据。宋生强等人[7]针对高废钢比冶炼条件,分析Ti、N析出热力学,提出降低N含量、控制Ti收得率是改善高钛钢洁净度的关键路径。张敏等人[8]针对中碳锰硼钢开展组织与性能研究,指出晶粒细化、组织均匀化与淬透性稳定性高度相关,为轧钢工艺优化提供支撑。

国外工程机械用钢生产企业注重钢水纯净度控制,Konar B[9]研究发现钛氮浓度积过高会导致TiN夹杂粗化,通过真空脱气提升脱氮效率,结合对Ti含量的控制,可减少TiN夹杂的尺寸与数量。Zhao Y[10]通过改进复吹转炉和RH精炼装置的脱氮技术,并严格控制钢水转运过程中的吸氮量,最终生产出的钢材平均氮含量仅约0.001 8%,部分甚至低至0.001 0%。Kim J等人[11]采用热力学平衡计算揭示齿轮钢中TiN夹杂物形成机制,明确成分、温度对夹杂物析出行为的影响规律。Wang M等人[12]针对中碳硼钢系统研究TiN夹杂物析出与长大行为,提出低温加热、快速轧制与低钛氮浓度积协同控制策略,可实现夹杂物尺寸与数量双控制。国外技术虽然成熟,但核心工艺参数保密,难以直接借鉴。现有关于35MnB钢的相关研究已具备一定的理论与试验基础,但在其专项适配、大断面铸坯工业化应用、B微合金化体系下Ti-N协同控制等方面仍有空白,需结合生产实际与服役需求深化研究。

本研究采用JMatPro材料热力学软件、光学显微镜等手段针对35MnB钢生产中的关键质量问题开展工艺优化,成功解决TiN夹杂物超标难题。通过对TiN夹杂物析出热力学的计算与分析,揭示TiN夹杂物在35MnB钢固液两相区的析出规律,明确钛氮浓度积与夹杂物析出特性的相关性,同时制定稳定的轧制工艺,为同类含Ti、N合金结构钢的夹杂物控制提供了理论依据和技术参考。

1 35MnB钢生产工艺

1.1 原有生产工艺概况

35MnB钢原有生产采用BOF—LF—RH—CC—轧制全流程工艺,具体流程如下:转炉吹炼—LF精炼(脱氧、合金化)—RH真空脱气—连铸(200 mm×240 mm断面铸坯)—棒材轧制—成品检验。其中,炼钢工序采用传统合金化工艺,喂入复氮合金包芯线调节钢中N含量;RH精炼真空度

控制在80~100 Pa，真空保持时间10~12 min；连铸工序中间罐钢水过热度控制波动较大；轧钢工序采用常规加热制度：预热段温度控制在≤900 ℃，加热段温度控制在1 070~1 140 ℃，均热段温度控制在1 140~1 210 ℃，开轧温度控制在1 030~1 110 ℃，终轧温度控制在930~1 010 ℃，铸坯在炉时间无明确规范，加热温度波动范围较宽。

1.2 原有生产存在的核心问题

通过对原有生产工艺的跟踪检测与数据分析，发现35MnB钢生产中存在的核心问题集中在TiN夹杂物超标，具体表现及诱因如下：

（1）TiN夹杂物等级超标：原有工艺生产的钢材，D类粗系夹杂物等级常达到1.2~1.5级，超出技术协议规定的1.0级上限，部分炉次因夹杂物超标判定为不合格，产品合格率仅为82%左右，严重影响供货稳定性。

（2）Ti、N含量管控精度不足：钢中Ti含量波动范围较大（0.022%~0.035%），N含量波动在0.004 5%~0.008 5%，导致Ti/N比值偏离4~8的合理区间，部分炉次Ti/N比值达到8.5以上，造成TiN夹杂物过量析出。

（3）工艺协同性差：复氮合金包芯线的喂入增加了钢中N含量，与Ti元素结合形成大量TiN夹杂物；RH精炼真空度不足、真空保持时间较短，脱氮效果不佳，钢中残余氮含量偏高；连铸过热度波动大、轧钢加热制度不规范，加剧TiN夹杂物的粗化与析出，同时导致钢材力学性能波动较大。

2 TiN夹杂物析出热力学、动力学分析与工艺优化试验

2.1 热力学与动力学分析

采用材料热力学软件计算35MnB钢的液相线温度、固相线温度，分析TiN夹杂物的析出温度区间及钛氮浓度积对夹杂物析出的影响规律。TiN夹杂物的析出行为与钢液凝固过程的温度场、元素扩散特性密切相关，其在液相区、固液两相区及固相区的析出尺寸差异，本质上由析出的热力学条件、元素扩散速率与形核长大动力学共同决定[13]，JMatPro热力学软件则通过精准的参数设计实现了该过程的定量模拟与工艺优化。

通过JMatePro构建热力学数据库与多相平衡模型，对TiN析出行为定量模拟，并围绕钢种成分、相平衡、浓度积计算开展参数设计[14]，具体如下：首先输入35MnB钢的全成分体系，基于CALPHAD（相图计算）方法，结合SGTE等标准热力学数据库，计算钢的液相线、固相线温度，明确TiN的潜在析出温度区间，为后续参数设计提供基础边界。软件内置TiN的热力学平衡模型，通过修正不同温度下Ti、N元素的活度系数，计算不同成分下TiN的平衡析出温度，构建钛氮浓度积与温度的对应关系，生成固液相线温度-成分曲线，直观呈现不同Ti、N含量下TiN的析出位置。基于相图与浓度积曲线，软件可定量输出工艺控制参数，进一步耦合凝固过程的元素偏析模型，模拟固液两相区Ti、N的富集行为，量化不同冷却速率、成分梯度下TiN的形核与长大规律，为炼钢工艺（如脱氧、合金化、控氮）的优化提供定量依据，实现TiN夹杂物的精准调控。35MnB钢固液相线温度计算过程及钛氮浓度积见图1。由图1（a）可知，35MnB钢液相线温度为1 498.77 ℃，固相线温度为1 420.78 ℃。

在液相区中，钢液完全处于液态，Ti、N元素在液相中扩散速率极快，形核后可快速捕获周围元素实现持续长大，易形成大尺寸、少数量的TiN夹杂物；在固液两相区中，钢液发生部分凝固，Ti、N元素在固相中溶解度极低，被持续排到剩余液相中，导致局部Ti、N浓度急剧富集，形核驱动力大幅提升，夹杂物形核率显著升高；同时剩余液相的扩散通道变窄，夹杂物在高过饱和度下快速形核、持续长大，最终形成尺寸大、数量多的粗大TiN颗粒，这是造成夹杂物评级不合格的核心诱因；在固相区中，钢液完全凝固为固态，Ti、N元素在固相中的扩散速率大幅降低，形核后缺乏足够的元素供应实现长大，仅能形成尺寸细小、数量少的弥散型TiN夹杂物，对钢材性能的负面影响较小。因此，通过控制钢中Ti含量和N含量，降低TiN析出温度，使TiN在固相线温度下析出，是实现夹杂物细化、消除不合格风险的核心技术路径。

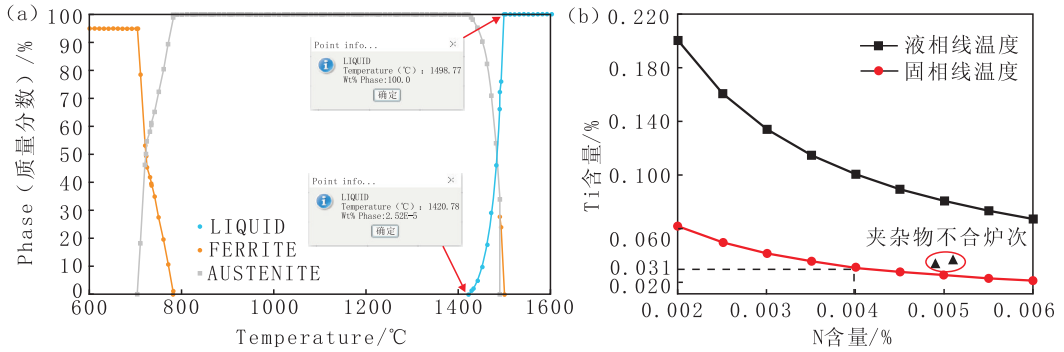
TiN的析出遵循浓度积原理，其平衡析出温度由钢中Ti、N元素的浓度积决定，公式为：

$$\lg(\omega[\mathrm{Ti}]\omega[\mathrm{N}]) = -\frac{15\,230}{T} + 5.64 \qquad (1)$$

式中，$\omega[\mathrm{Ti}]$、$\omega[\mathrm{N}]$分别为基体中Ti、N的质量分

数；T为热力学温度，K。

由图1(b)可知，当钢中N含量为0.004%时，应控制Ti含量≤0.031%，并通过上述理论分析对炼钢工艺进行优化调整。



(a) JMatePro计算过程；(b) 钛氮浓度积

图1 35MnB钢固液相线温度计算过程及钛氮浓度积

Fig. 1 Solidus-Liquidus Temperature Calculation and Ti-N Solubility Product of 35MnB Steel

2.2 工艺优化试验

调整炼钢的关键工艺参数，包括Ti含量控制范围、RH精炼真空保持时间、取消复氮合金包芯线喂入等手段，采用优特钢厂8#连铸机，锻造3炉200 mm×240 mm断面铸坯，采用优特钢厂3#棒材机组对试验铸坯进行轧制，调整轧钢关键工艺参数，包括铸坯加热制度、在炉时间等。通过化学成分检测、低倍组织检验、金相显微镜观察、末端淬透性试验、热顶锻试验等手段，对钢材的质量性能进行全面评价，并验证工艺优化效果。试验钢的化学成分(质量分数)如表1所示。

表1 试验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical Composition of the Test Steel (Mass Fraction) %

熔炼号	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	B	Al	Ti
24608136	0.36	1.19	0.20	0.018	0.001	0.18	0.01	0.01	0.002 4	0.022	0.025
24608137	0.37	1.21	0.20	0.015	0.001	0.19	0.01	0.01	0.002 2	0.025	0.025
24608138	0.36	1.21	0.20	0.012	0.001	0.18	0.01	0.02	0.002 0	0.023	0.029

工艺参数完成优化调整后，对全部试验炉次的试样进行金相检验，各炉次金相组织如图2所示。由图2可知，各炉次D类非金属夹杂物等级为1.0级，其核心检验指标均完全满足技术协议对D类粗系夹杂物等级≤1.0级的要求。

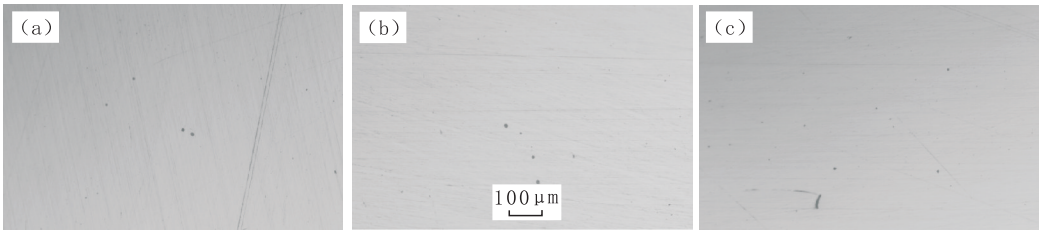
通过前期工艺优化，不同炉次35MnB钢钛氮浓度积如图3所示，由图3可知，工艺优化后3个炉次钢液中钛氮浓度积得到有效控制与降低，由原来的固液相区调整至近固相区，改变了TiN夹杂物的析出热力学条件，夹杂物析出温度降至钢的固相线温度以下，TiN夹杂物在固态钢中析出，有效规避了其在固液两相区粗化长大的问题，最终实现夹杂物尺寸显著细化、数量大幅减少，钢基体纯净度得到大幅提升。

3 含钛钢夹杂物控制生产工艺优化

为了确保试验钢优异的强韧性匹配与工程机械服役性能，针对35MnB钢的全流程生产制造环节展开系统性工艺优化与精准控制，确立了一套工业化生产规范。

3.1 炼钢工序

在炼钢工序中，核心在于高纯净度的钢水制备与关键合金元素的精准调控。将Ti元素质量分数控制在0.025%~0.030%，抑制TiN化合物的过量析出与粗化，确保钢内部组织的纯净度。为减少氮源引入途径，取消了传统的合金包芯



(a) 24608136炉次；(b) 24608137炉次；(c) 24608138炉次

图2 各炉次35MnB钢金相组织

Fig. 2 Metallographic Microstructure of 35MnB Steel in Each Heat

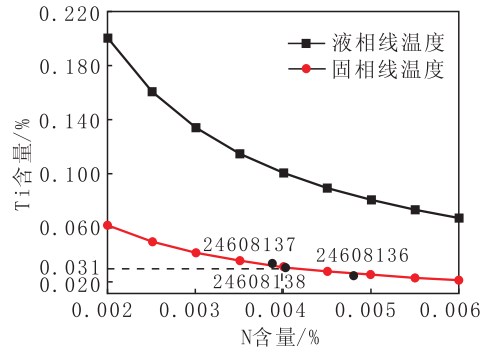


图3 不同炉次35MnB钢钛氮浓度积

Fig. 3 Solidus and Liquidus Temperatures and Ti-N Solubility Product of 35MnB Steel in Different Heats

线复氮工艺，从源头减少TiN析出的物质条件。同时，强化RH真空精炼环节的精炼效率，将系统真空度控制在≤67 Pa，并延长真空保持时间至15 min以上，目的是充分脱气，去除钢水中的[H]、[N]及细小夹杂物，显著提高钢水洁净度。

3.2 连铸工序

在连铸工序阶段，通过精准控制中间包钢水的过热度，有效防止因过热度偏大导致的柱状晶过分长大及中心疏松等缺陷，确保铸坯等轴晶区的合理比例。同时，优化全保护浇铸操作流程，隔绝空气二次氧化路径，减少外来夹杂的卷入，保障铸坯具有优良的低倍组织和内部致密度。

3.3 轧钢工序

在轧钢工序中，实施三段式加热与轧制温控制度，以实现显微组织的均匀化与力学性能的最优化。在加热阶段，执行低温快速预热制度，预热段温度控制在≤900 ℃，减少铸坯在加热过程中的氧化烧损与热应力；加热段与均热段则分别维持在1 070~1 140 ℃与1 140~1 210 ℃的高温区间，确保碳氮化物充分固溶，奥氏体晶粒充分再结晶。在轧制阶段，开轧温度控制在1 030~1 110 ℃，保证变形奥氏体具有足够的塑性与变形能力；终轧温度控制在930~1 010 ℃，确保在未再结晶区进行大变形轧制，诱发产生细小的铁素体与珠光体组织。此外，将铸坯在炉总时间严格标定为120~128 min，通过稳定的加热制度确保轧制过程工况平稳，有效消除组织与性能的波动风险。

通过上述从炼钢—连铸—轧钢的全流程协同优化，实现了35MnB钢的高效、高质、稳定工业化生产，为该钢种的工程化应用提供了坚实的技术保障。

4 工艺优化效果验证

为进一步量化分析工艺优化对35MnB钢综合性能的提升效果，验证优化工艺在改善钢材纯净度、稳定组织与力学性能方面的实际作用，选取工艺优化前常规生产的两炉批次钢材（炉号分别为24610520、24610521）作为对照组，与本次试验成品进行对比。对比试验遵循统一的试验标准与检测方法，同步检测非金属夹杂物级别、末端淬透性、化学成分偏差、低倍组织缺陷、热顶锻合格率等关键指标，通过横向数据对比与差异分析，系统评估工艺优化带来的质量改善成效。工艺优化后，各炉次化学成分检验结果见表2。

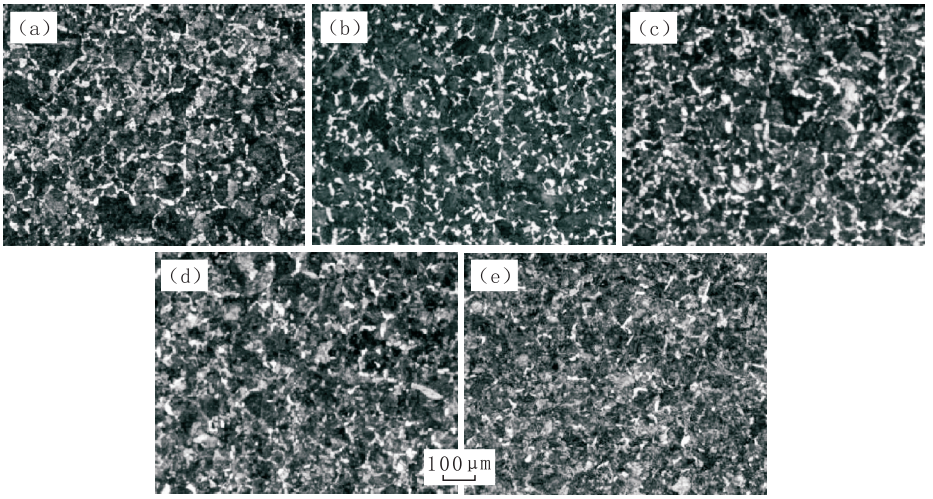
由表2可知，各元素化学成分配比均匀，关键Ti/N比值控制在合理区间，符合协议要求；而原有工艺对比炉次因Ti元素含量管控波动较大，导致Ti/N比值分别为8.1和8.5，小幅超出协议上限。

各炉次金相组织如图4所示，由图4可知，试验炉次试样整体金相组织均匀性优良，基体组织连续分布，未出现明显元素偏聚与带状偏析缺陷；材料晶粒细化效果显著、尺寸均匀，晶界轮廓清晰且洁净，无粗大晶粒、混晶现象及异常相变组织；对比炉次金相组织均匀性欠佳，局部区域出现粗大晶粒、混晶及异常组织，晶界洁净度下降，伴随有害第二相析出。

表2 各炉次化学成分检验结果

Table 2 Chemical Composition Test Results of Each Heat %

炉号	熔炼成分(质量分数)											气体含量		Ti/N
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	B	Al	Ti	[N]	[O]	
协议要求	0.33~0.38	0.15~0.30	1.17~1.27	≤0.025	≤0.025	0.15~0.25	≤0.20	≤0.25	0.000 8~0.003 5	0.015~0.065	0.020~0.065	≤0.008 0	≤0.002 00	4~8
24608136	0.37	0.21	1.19	0.019	0.001	0.19	0.01	0.01	0.002 5	0.023	0.025	0.004 8	0.000 54	5.2
24608137	0.37	0.21	1.22	0.015	0.001	0.19	0.01	0.02	0.002 3	0.026	0.026	0.003 8	0.000 62	6.9
24608138	0.36	0.21	1.21	0.012	0.002	0.19	0.01	0.01	0.002 0	0.024	0.030	0.004 0	0.000 64	7.5
24610520	0.35	0.22	1.21	0.009	0.001	0.19	0.02	0.02	0.002 6	0.024	0.029	0.003 6	0.000 77	8.1
24610521	0.36	0.21	1.25	0.017	0.003	0.19	0.02	0.02	0.002 6	0.029	0.033	0.003 9	0.000 73	8.5



(a) 24608136炉次；(b) 24608137炉次；(c) 24608138炉次；(d) 24610520炉次；(e) 24610521炉次

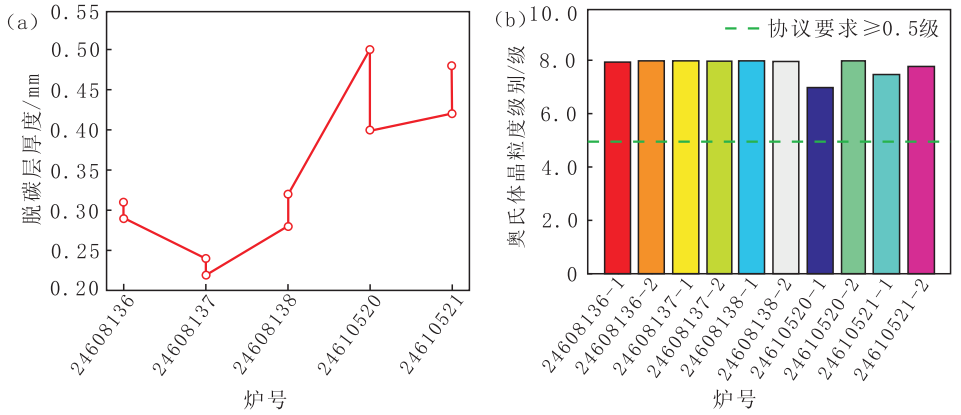
图4 各炉次金相组织

Fig. 4 Metallographic Structures of Each Heat

各炉次金相检验结果对比如图5所示，由图5可知，试验炉次表层脱碳层厚度均匀，整体厚度显著低于技术协议限定指标，表面无完全脱碳层，仅存在极薄局部脱碳区域，脱碳层深度可稳定控制在0.50 mm以内，同时奥氏体晶粒度稳定维持在8.0级；对比炉次表层脱碳层厚度分布不均，深度波动幅度较大，局部脱碳层最大厚度可达0.50 mm，同时奥氏体晶粒度等级存在明显波动。

各炉次非金属夹杂物检验结果如图6所示，由图6可知，试验炉次在经过全流程工艺优化后，TiN析出得到明显抑制，夹杂物数量与尺寸均显著降低。经评级检测，各试验炉次D类粗系非金属夹杂物等级均控制在1.0级以下，满足技术协议规定的控制要求。采用原工艺生产的对比炉次夹杂物控制效果较差，炉号24610520初次检验时D类粗系夹杂物达到1.5级，超出技术协议控制范围，判定为不满足使用要求。

各炉次末端淬透性检验结果如图7所示。由图7可知，本次工艺优化后的试验炉次，末端淬透性指标全部符合技术协议规定的技术要求(J1.5：51~57(HRC)、J9：44~53(HRC)、J13：38~48(HRC)、J19：26~36(HRC))，且各炉次检测数据波动幅度极小，整体控制较稳定，批次间性能一致性良好。对比炉次的末端淬透性指标虽也均达到技术协议要求，未出现超标情况，但受原工艺参数管控精度不足的影响，各炉次检测数据离散程度偏大，性能稳定性相较于试验炉次存在明显差距。



(a) 脱碳层厚度变化；(b) 奥氏体晶粒度

图5 各炉次金相检验结果

Fig. 5 Metallographic Examination Results of Each Heat

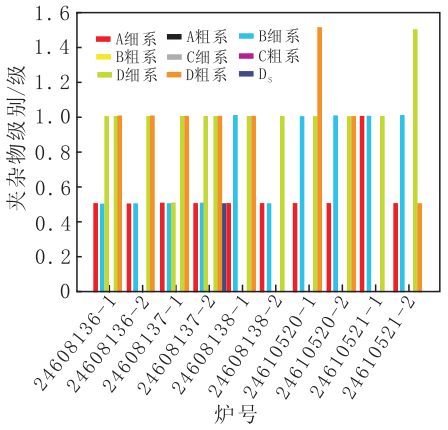


图6 各炉次非金属夹杂物检验结果

Fig. 6 Non-metallic Inclusions Examination Results in Each Heat

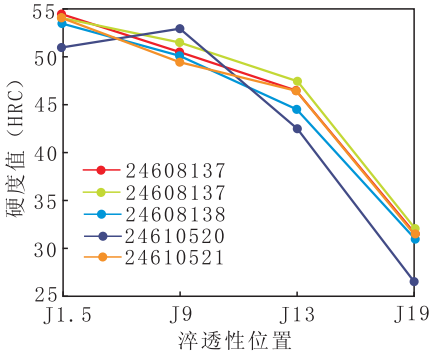


图7 各炉次末端淬透性检验结果

Fig. 7 End Hardenability Test Results in Each Heat

各炉次热顶锻检验结果如图8所示，由图8可知，本次工艺优化后的试验炉次试样，未发现肉眼可见的裂纹或缺陷，符合技术协议判定标准（裂纹最大深度≤0.3 mm）。采用原有工艺的对比炉次，虽然整体热顶锻性能处于合格范围内，但在检测中发现试样表面存在长度约为0.2 mm的点状微裂纹，裂纹宏观形貌如图9所示。

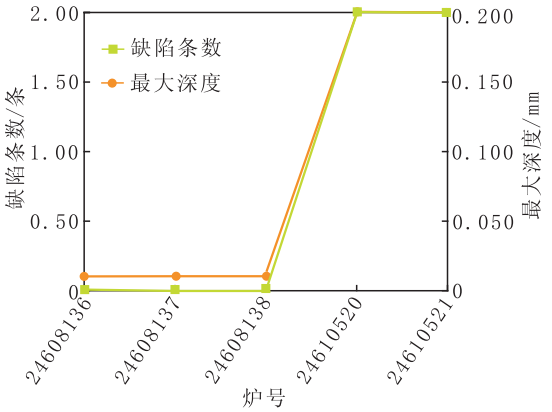


图8 各炉次热顶锻检验结果

Fig. 8 Hot Upsetting Test Results of Each Heat

各炉次低倍组织评级结果如图10所示，由图10可知，本次工艺优化后的试验炉次与原工艺对比炉次的铸坯低倍组织均无中心疏松、中心偏析、缩孔及夹杂等缺陷，组织致密均匀，各项评级指标均符合技术协议规定的合格要求，未出现明显异常组织形貌，各炉次宏观形貌见图11。

经全面系统的理化性能检测与质量验证，优化后工艺生产的35MnB钢成品，各项质量指标均稳定可控，其中非金属夹杂物等级与末端淬透性指标控制稳定性显著提升，指标波动幅度大幅缩小，攻克了原有生产工艺中夹杂物管控不佳、淬透性波动较大的技术难题。对成品钢材的化学成分均匀性、低倍组织致密性、热顶锻性能等核心技术指标进行逐项检验，所有检

测结果均完全满足技术协议规定的要求，无单项指标超标或不合格情况，证实了本次炼钢、连铸及轧钢全流程工艺优化方案的工业可行性与实践有效性。



(a) 24610520炉次；(b) 24610521炉次

图9 裂纹宏观形貌

Fig. 9 Macroscopic Morphology of Crack

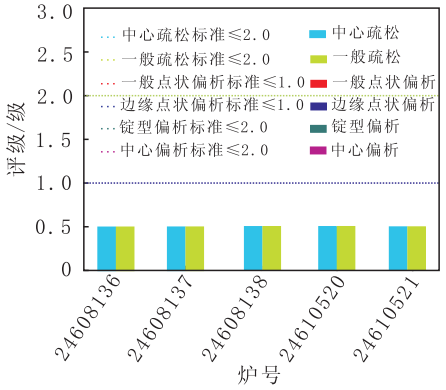


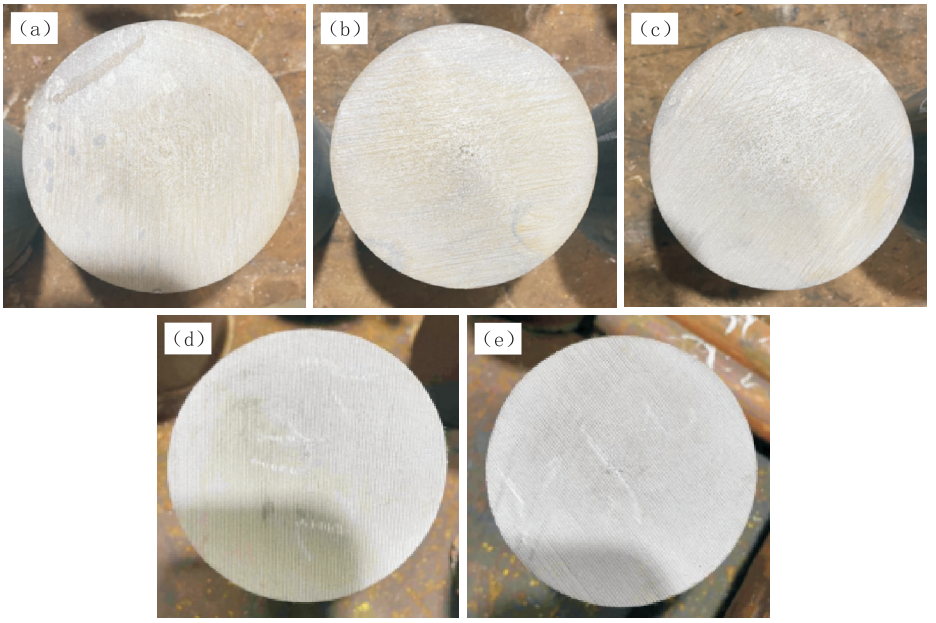
图10 各炉次低倍组织评级结果

Fig. 10 Macrostructure Rating Results of Each Heat

5 结论

本研究明确了TiN夹杂物在35MnB钢中的析出机制，确定影响夹杂物析出的关键工艺因素；优化了炼钢工艺参数，建立Ti含量、N含量及RH精炼工艺的合理控制范围；验证了优化工艺对钢材各项性能指标的改善效果，确保产品满足技术协议要求。通过上述试验为35MnB钢的稳定工业化生产提供了可靠的技术方案，同时为同类工程机械用钢的质量控制提供了参考。主要结论如下：

(1) 通过JMatPro材料热力学软件模拟分析与工艺优化，明确了35MnB钢中TiN夹杂物的析



(a) 24608136炉次；(b) 24608137炉次；(c) 24608138炉次；(d) 24610520炉次；(e) 24610521炉次

图11 各炉次宏观形貌

Fig. 11 Macroscopic Morphology of Each Heat

出规律，形成了35MnB钢的优化炼钢生产工艺：Ti含量控制在0.025%~0.030%，取消复氮合金包芯线喂入，RH真空度≤67 Pa，保持时间≥15 min，有效改善了夹杂物超标问题。

（2）制定稳定的轧制工艺：加热温度（预热段温度≤900 ℃、加热段温度1 070~1 140 ℃、均热段温度1 140~1 210 ℃）、轧制温度（开轧温度1 030~1 110 ℃、终轧温度930~1 010 ℃）及在炉时间（120~128 min），为同类含Ti、N合金结构钢的夹杂物控制提供了理论依据和技术参考。

（3）试验生产的35MnB钢成品，非金属夹杂物和末端淬透性控制更加稳定，化学成分、低倍组织、金相组织等核心技术指标均符合协议要求。

参考文献

[1] 吴爱青，杨小芳，孙叶，等. 挖掘机链轨节失效分析及改善[J]. 金属加工（热加工），2025(4)：156-160，166.
[2] 袁淑君，戈文英，欧阳峥容，等. 链轨节用35MnB钢的开发生产实践[J]. 山东冶金，2016，38(2)：13-15.
[3] 杨占兵，王福明，宋波，等. 含Ti复合夹杂物对中碳非调质钢组织和力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报，2007(11)：1096-1100.
[4] 彭光健，花含平，徐瑞军，等. 链轨节用35MnBH钢中Ti/N的控制实践[J]. 中国金属通报，2019(11)：106-107.
[5] 王贺明，董复明，孟庆勇，等. 高钛钢TiN类夹杂物控制技术实践[J]. 冶金与材料，2025，45(10)：106-108.
[6] 李国胜，战东平，方宇荣，等. BOF-LF-VD-CC过程35MnB钢中夹杂物的演变分析[J]. 钢铁研究学报，2023，35(5)：568-577.
[7] 宋生强，可向山，齐江华. 高废钢比条件下含钛钢中氮化钛夹杂析出与控制[J]. 钢铁研究学报，2025，37(5)：557-569.
[8] 张敏，李辉，赵亮. 中碳锰硼钢淬透性控制与组织性能研究[J]. 特殊钢，2024，45(3)：45-48.
[9] Konar B，Quintana N，Sharma M. Modeling and Optimization of the Vacuum Degassing Process in Electric Steelmaking Route [J]. Processes，2025，13(8)：2368-2368.
[10] Zhao Y，Yang Y，Barati M，et al. Strategies for nitrogen control during the production of interstitial-free steel[J]. Ironmaking & Steelmaking，2018，45(6)：485-491.
[11] Kim J，Lee S，Park J. Thermodynamic equilibrium and formation mechanism of TiN inclusions in gear steels[J]. Materials，2025，16(12)：432-439.
[12] Wang M，Min B. Control of precipitation and growth of TiN inclusions in medium-carbon boron steels [J]. Journal of Iron and Steel Research International，2024，31(4)：589-601.
[13] 张立峰，段东明，李金许. 钢中TiN夹杂物形核、长大与析出行为研究进展 [J]. 材料热处理学报，2015，36(S1)：1-8.
[14] 刘静，杨亮，李晶. JMatPro在钢中第二相析出热力学模拟中的应用 [J]. 材料科学与工艺，2016，24(2)：44-49.

（编辑　白璐）
修回日期：2026-04-14

（上接第14页）

[20] 吴海滨，姚茜，申远，等.“双碳”背景下的山西省钢铁行业低碳发展路径[J]. 当代化工研究，2023(4)：184-187.
[21] 韩中奎，代涛，李强峰，等. 基于动态物质流分析的中国铁二次资源回收潜力研究[J]. 地球学报，2023，44(2)：315-324.
[22] 李晓，彭锋. 我国电炉钢生产现状及发展前景[J]. 特殊钢，2009，30(2)：27-29.
[23] 孟华栋，陈超，赵小军，等. 电炉智能化炼钢技术实践与冶金效果分析[J]. 钢铁研究学报，2026，38(1)：50-61.
[24] 何鹏，吴学涛，张豫川，等. 电炉工艺模型进展与思考[J]. 工业加热，2025，54(8)：1-10，22.
[25] 李佳，孙大鹏，罗筱薇，等. 碳达峰碳中和新形势下电炉炼钢的机遇与挑战[J]. 现代工业经济和信息化，2024，14(10)：262-264.
[26] 李新宇，林严，苏步新. 中国电炉钢生产力布局现状分析与展望[J]. 中国冶金，2025，35(5)：22-32，74.
[27] 江宣. 转炉炼钢和电炉炼钢的优缺点比较分析[J]. 冶金与材料，2023，43(1)：83-85.
[28] 张琦，田硕硕，李星宇，等. 碳中和目标下中国废钢资源量预测及高质利用策略[J]. 钢铁，2024，59(9)：205-214.
[29] 刘永彬. 废钢铁回收利用体系建设及发展前景展望[J]. 再生资源与循环经济，2012，5(5)：25-26，30.
[30] 财政部，税务总局. 关于完善资源综合利用增值税政策的公告[J]. 再生资源与循环经济，2022，15(1)：6-7.
[31] 上官方钦. 中国全废钢电炉流程发展战略：意义、挑战与路径探索[J]. 资源再生，2025(11)：12-14.
[32] 再生资源全生命周期循环利用联合创新中心揭牌成立[J]. 再生资源与循环经济，2023，16(11)：32.

（编辑　许营）
修回日期：2026-02-24