

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20250060

## 双辊薄带铸轧工业化关键技术研究进展

袁国, 王超, 李振垒, 王国栋

(东北大学 数字钢铁全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 双辊薄带铸轧作为材料与冶金领域重要的铸轧一体化短流程工艺技术,在薄规格板带钢、特殊钢和特殊合金制备领域具有重大应用价值. 针对双辊薄带铸轧过程高温熔体流动与传热过程中存在的多元、多相、多变量、强耦合的复杂理论及技术难题,本文综述了双辊薄带铸轧关键技术、工艺控制策略及产品技术相关研究进展,基于理论研究与技术开发实践,重点介绍了高温熔体布流、铸辊冷却、侧封技术以及铸轧工艺控制等方面的自主创新成果与技术应用情况,并指出需要深入研究的理论与技术难题,以推动该技术在高端高质钢铁材料研发生产中的应用.

**关键词:** 钢铁;双辊薄带铸轧;工艺技术;控制策略;产品技术

中图分类号: TG 244 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)08-0001-10

## Research Progress in Key Technologies of Twin-Roll Strip Casting for Industrialization

YUAN Guo, WANG Chao, LI Zhen-lei, WANG Guo-dong

(State Key Laboratory of Digital Steel, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YUAN Guo, E-mail: yuanguoneu@163.com)

**Abstract:** As an important integrated casting-rolling short-process technology in the field of materials and metallurgy, twin-roll strip casting has significant application value in the preparation of thin-gauge strip steel, special steels, and special alloys. Addressing the complex theoretical and technical challenges of multi-element, multi-phase, multi-variable, and strongly coupled high-temperature melt flow and heat transfer during the twin-roll strip casting process, this paper reviews the research progress on key technologies, process control strategies, and product-related technologies. Based on theoretical research and technological development practices, it highlights the independent innovative achievements and technical applications in high-temperature melt distribution, casting roller cooling, side sealing technology, and casting-rolling process control. Finally, it points out the theoretical and technical issues that require further study to promote the application of this technology in the research and production of high-end, high-quality steel materials.

**Key words:** steel; twin-roll strip casting; process technology; control strategy; product technology

双辊薄带铸轧,也称双辊薄带连铸,作为材料与冶金领域重要的短流程工艺技术,是通过两个逆向旋转的结晶器辊将液态金属快速凝固成形为薄带的金属材料加工方法.视金属材料特性与铸轧工艺不同,通过双辊薄带铸轧工艺方法能够获得0.5~6 mm厚度的薄带坯,合金材料还可获

得0.5 mm厚度以下甚至微米级厚度的薄带材(片).在钢铁领域,相较于传统热轧带钢连铸连轧生产流程与薄板坯连铸连轧工艺,双辊薄带铸轧技术因其亚快速凝固特性省却了传统钢铁工艺中铸坯再加热与粗轧等工序,使得产线长度大幅缩短,如图1所示.该紧凑型工艺设计显著降低

收稿日期: 2025-05-26

作者简介: 袁国(1979—),男,山东泰安人,东北大学教授,博士生导师;王国栋(1942—),男,辽宁大连人,东北大学教授,博士生导师,中国工程院院士.

了能耗与排放,成为钢铁行业具有重大潜力的绿色制造工艺技术。

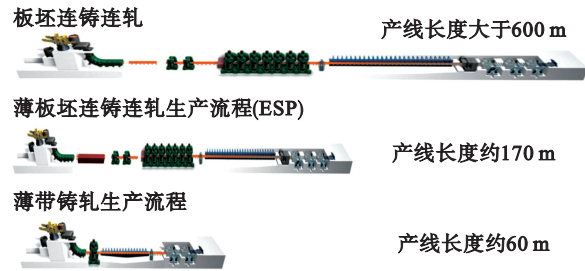


图 1 典型热轧带钢生产线工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of process flow for typical hot rolled strip production line

在钢铁领域,自 1856 年英国冶金学家 Bessemer 首次提出双辊薄带连铸概念以来,该技术已从工艺概念实现工业产线落地<sup>[1]</sup>.目前已形成若干具有代表性的双辊薄带铸轧工业化技术体系,包括新日本钢铁公司的带钢直接连铸(direct strip casting, DSC)技术、欧洲联合研发的 Eurostrip 技术、韩国浦项钢铁的 Postrip 技术以及美国纽柯公司的 CASTRIP 技术<sup>[2]</sup>.相关产线发展状况详见表 1.目前国际上以美国纽柯公司 CASTRIP 技术为代表,在双辊薄带铸轧工业化技术领域取得显著突破。

国内关于双辊薄带铸轧的相关研究始于 20

世纪 50 年代.我国 20 世纪 80 年代以后在双辊薄带铸轧领域不断投入研究力量,推动了双辊薄带铸轧相关的科学研究与工业化技术创新,并取得了突破性进展.2014 年,中国宝武钢铁集团在浙江宁波建成了国内首条双辊薄带连铸连轧示范生产线 Baostrip,实现了 360 t 钢水的稳定连续浇铸<sup>[3]</sup>.江苏沙钢集团全面引进美国纽柯公司的 CASTRIP 技术建成生产线,并在产线建设与产品研发方面取得了一系列创新成果<sup>[4]</sup>.东北大学作为国内研究双辊薄带铸轧工艺较早的高校之一,1961 年建成了异径双辊连铸机,并铸出能够加工出合格锯条、刀片的铸带.21 世纪初期,东北大学基于设计的等径双辊薄带铸机,提出了绿色化双辊薄带铸轧电工钢生产技术(E<sup>2</sup>Strip),开展了系列钢铁材料的双辊薄带铸轧工艺研究工作.2016 年,东北大学与河北敬业集团合作,建设具有完全自主知识产权的电工钢双辊薄带铸轧生产线,目前已在铸轧工艺、装备技术以及产品质量控制等方面实现系列核心技术突破<sup>[5]</sup>.

本文结合双辊薄带铸轧技术的发展概况,对双辊薄带铸轧工艺的关键技术进行了系统分析,并基于承担的电工钢双辊薄带铸轧工业化关键技术开发工作,介绍了自主创新的双辊薄带铸轧工业化技术进展,以期推动高端高质钢铁材料双辊薄带铸轧工艺技术的创新发展。

表 1 国内外双辊薄带铸轧产线发展状态

Table 1 Development status of domestic and foreign twin-roll strip casting production lines

项目	浇铸速度/(m·min <sup>-1</sup> )	产品厚度/mm	浇铸钢种	铸辊辊径/mm	发展情况
DSC	≤90	1.6~5	不锈钢	1 200	终止生产
Eurostrip	40~90	1.4~3.5	不锈钢	1 500	工业化进程
	≤150				
Postrip	30~130	1.6~4	不锈钢	1 200	工业化进程
	≤160				
CASTRIP	40~120	0.7~2.0	碳钢	500	商业化进程
Baostrip	30~130	0.8~3.6	碳钢	800	工业化进程
E <sup>2</sup> Strip	30~75	1.0~2.2	碳钢、硅钢	500	工业化进程

## 1 薄带铸轧关键技术及工艺控制策略

以某双辊薄带铸轧工业化产线工艺流程为例,双辊薄带铸轧工艺如图 2 所示,液态钢水经布流包浇铸至两个相对旋转的铸辊与侧封板构成的熔池中,在极短时间内完成液态金属向固态金属的转变.凝固成形的铸带经过单道次热轧,便

可获得薄规格带钢.从铸轧工序来看,双辊薄带铸轧主要涉及钢液在熔池内的均匀布流、结晶辊凝固传热以及长寿命侧封等技术.从全流程工序看,涉及全线工艺控制策略以及带钢板形、张力等协同控制技术。

### 1.1 关键工艺与装备技术

#### 1.1.1 熔池布流技术

双辊薄带铸轧工艺过程中,熔池内高温熔体的流动特性直接影响凝固前沿稳定性与铸带微

观及宏观缺陷形成机制.大量理论与实践表明,熔体流场需满足准稳态对称分布条件以抑制非平衡凝固行为;然而熔体流动行为受设备条件约束,如布流器结构参数、侧封板与铸辊界面间隙,以及热力耦合边界条件(如温度梯度、铸辊转速等)共同作用,导致其呈现高度非线性特征<sup>[6]</sup>.浸入式布流器、铸辊、侧封板构成的熔池区域几何模型如图3所示.当前研究主要通过构建熔体流动与凝固的多尺度关联模型,揭示布流器结构与铸辊及侧封板的协同调控机制,为提高熔池流场均匀性提供理论依据.

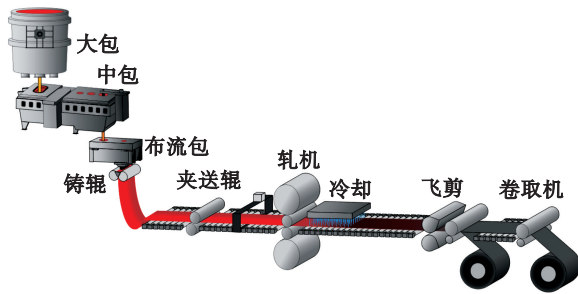


图2 双辊薄带铸轧工艺流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of process flow for twin-roll strip casting

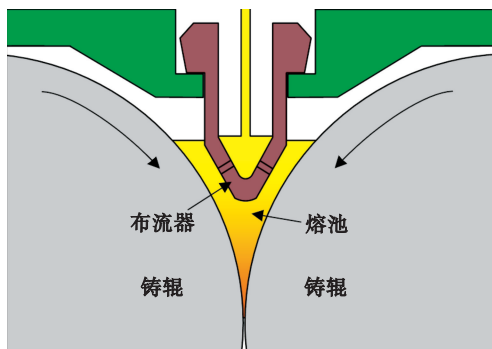


图3 布流器结构与熔池示意图

Fig. 3 Schematic diagram of flow distributor structure and molten pool

双辊薄带铸轧工艺中,熔池内钢液流量分布的均匀性控制是决定凝固前沿稳定性与铸带表面质量的关键.相关研究聚焦于通过优化布流器结构来实现熔池液位波动抑制和温度均匀控制的双重目标<sup>[7]</sup>.理论分析与工程实践表明,布流器几何构型与浇铸工艺参数的匹配机制是实现熔池热-流耦合协同调控的核心路径.相关文献报道了布流器出流孔分布、布流器长度等对布流效果的影响.钟勇<sup>[8]</sup>针对直径800 mm、长度1 800 mm的铸辊所形成的熔池进行了数值模拟研究,论证了布流器出流孔的最佳分布方案,同时证明布流器长

度不应小于1 600 mm,以使熔池液面湍流动能尽可能均匀分布.Xu等<sup>[9]</sup>基于数值模拟与水模实验,提出布流器结构应能够抑制结晶辊工作面动量边界层的发展,降低楔形区深度以提高工艺稳定性.

基于上述分析,相关研究聚焦于通过布流器结构优化来调控双辊薄带铸轧过程中熔池液面的速度波动.然而,在布流器结构与布流工艺参数耦合作用下,熔池液位波动的稳定控制机制仍有待深入研究,特别是铸辊、侧封板与熔融钢液三相接触区域的流场均匀性分布问题有待进一步探索.此外,在铸辊高速旋转工况下,熔池与铸辊接触界面处凝固坯壳的形成机理及其动态演变规律未见相关报道,仍有待开展相关研究.

### 1.1.2 铸辊传热技术

在双辊薄带铸轧工艺中,结晶辊作为核心功能部件,其作用包含熔体凝固过程控制与铸带质量协同优化两个维度.结晶辊不仅承担熔体的亚快速凝固调控功能,同时通过表面形貌与热传导特性直接影响铸带组织性能及表面质量.

铸辊以铜合金作为主要导热材料,通过冷却水道带走高温熔体液固转变的热量.铸辊结构设计对于改善双辊薄带铸轧工艺冷却能力、提高生产效率至关重要.Bai等<sup>[10]</sup>对冷却水流动强度与凝固结构之间的关系进行了模拟研究,证明随着冷却水流量的增大,有利于晶核与柱状晶的生长,从而获得性能理想的铸带.蒋恩等<sup>[11]</sup>利用有限体积法对比分析了冷却水道的布置及进出口压力差对流场的影响.

在双辊薄带铸轧过程中,热量以铸带—铸辊—冷却水的顺序进行传导.传导过程中凝固坯壳与铸辊之间存在较大热阻,因此调控铸辊表面形貌可有效增加铸辊与钢液间的界面传热能力,进而改善铸带质量.朱光明等<sup>[12]</sup>针对双辊薄带铸轧工艺中结晶辊的热/力行为开展了系统研究,聚焦于辊面温度分布、热变形规律及动态辊型演变特性,通过构建结晶辊热弹塑性变形预测模型,有效预测了熔池出口附近位置结晶辊的温度分布规律与热凸度特性.Wang等<sup>[13]</sup>对铸辊表面的镀层以及浇铸过程中产生的自然沉积膜进行了理论与实验研究.结果表明,镀层厚度、粗糙度以及基体表面自然沉积膜的形貌均能对熔体与基体接触换热过程产生显著影响.

对于双辊薄带铸轧工艺,铸辊辊型是指为满足铸轧成形过程中铸带尺寸形状要求而加工的辊型曲线.铸辊辊面在高温、应力及变形耦合作

用下几何尺寸将发生动态变化,其核心参数包括辊面凸度、轮廓曲线及热力耦合变形量等。铸辊的辊型设计需综合考虑熔池内钢液凝固收缩、铸轧载荷分布以及辊系弹性变形等因素,通过预设辊面几何补偿量来抵消动态工艺条件下的非均匀尺寸变化。典型辊型优化目标涵盖铸轧力分布、带坯厚度一致性及微观组织均匀性,结合数值仿真与实验标定实现参数协同匹配,是保障双辊薄带铸轧过程带钢成形质量的关键设备结构要素。

良好的辊型设计可抑制因热力分布不均引发的铸带边部减薄、中心偏析及表面裂纹等缺陷,同时降低辊面局部热冲击导致的疲劳损伤风险。研究表明,辊型参数偏差超过  $10\ \mu\text{m}$  就可能引起凝固坯壳应力集中,导致微观枝晶取向异常或宏观板形失稳。此外,辊型的动态响应特性与铸轧速度、冷却强度的非线性关联机制尚未完全解析,亟需建立多尺度耦合模型以揭示辊型、工艺、铸带成形尺寸之间的映射规律。

基于上述分析,诸多学者针对铸辊与熔池接触界面建立了多种理论假设模型,以预测铸辊温度分布及变形特征。然而,由于这些固有假设的局限性,导致其难以准确表征铸辊与熔池之间的传热特征;铸辊与熔池接触界面的微观传热机理仍需进一步探究。此外,现有研究主要集中于浇铸过程中铸辊温度分布的数值模拟预测,对于实际生产条件下铸辊设备运行状态(例如铸辊热变形与浇铸过程中实际的辊缝形状)的研究未见相关报道。特别地,在铸辊结构与浇铸工艺参数耦合作用下的铸带尺寸动态调控机制研究领域,目前尚未形成完整的理论体系与技术方案。

### 1.1.3 侧封技术

侧封作为双辊薄带铸轧的又一核心部件,由侧封机构、耐高温抗侵蚀侧封板及动态压力控制系统组成。在侧封板服役过程中,通过设备结构约束与热力学匹配机制实现铸辊端部熔池密封。侧封性能直接影响铸带边部形貌与工艺稳定性,其技术核心在于侧封板与旋转铸辊端面构成的动态密封界面,需在高温( $1\ 200\sim 1\ 600\ \text{°C}$ )与机械载荷耦合作用下保持细小的间隙控制。

由于侧封板在恶劣的服役工况下工作,要求其具有耐钢水侵蚀、耐热冲击、耐磨等多种特性。目前多采用氮化硼作为基体,在其中加入氧化锆、碳化硅等材料制成复合陶瓷侧封板<sup>[14]</sup>。氮化硼基复合侧封板具有良好的热稳定性和低热膨

胀系数,可以有效降低侧封板的热应力,提高侧封板的使用寿命,已在薄带铸轧工业化产线得到广泛应用。郭海荣等<sup>[15]</sup>报道了双辊薄带铸轧过程中侧封板的受热与受力情况,为优化侧封板的几何结构及材料的选择提供了理论依据。通过对侧封的几何结构、材料成分、机械性能以及控制过程进行持续优化,侧封效果的稳定性可得到有效保障,浇铸时间得以延长,铸带产品的边部质量显著提升。持续提升侧封技术水平是实现薄带铸轧稳态浇铸和长周期连续浇铸的关键。

值得注意的是,目前公开报道中鲜有关于侧封板在实际生产状态下的服役性能评估研究。侧封板在高温钢液侵蚀、铸辊与铸带高温摩擦磨损以及侧封机构机械约束等多因素耦合作用下的断裂失效机理仍有待深入研究。针对侧封板实际服役工况开发新型侧封板结构或优化侧封机构,在确保浇铸过程稳定进行的同时,进一步提升侧封板使用寿命、延长连续浇铸时间,是薄带铸轧工艺持续优化至关重要的内容。

## 1.2 铸轧工艺及控制策略

双辊薄带铸轧工艺因其短流程特性,铸机区域的装备技术与传统连铸连轧产线存在很大区别。铸带成形后在导出至水平辊道时,呈无张力的自由状态。为保证单机架轧机的轧制效果,需使铸带与轧机之间存在一定的张力,为此在轧机前需要设置一台夹送辊以满足轧制前张力的需求。与常规轧钢产线夹送辊不同,双辊薄带铸轧前夹送辊有其工艺特殊性。首先,由于铸带在进入夹送辊时处于无张力的自由状态,因此夹送辊在对铸带进行张力控制的同时,还需具备一定的纠偏功能;其次,铸带在夹送辊处的温度较高,通常在  $1\ 000\ \text{°C}$  以上,夹送辊需满足高温长时间稳定使用的需求;此外,由于夹送辊处铸带温度高、强度低,夹送辊表面处理以及工艺参数设计都需要进行特殊设计。受双辊薄带铸轧工艺应用范围所限,关于轧机前夹送辊的相关研究不多,仅在部分有条件开展双辊薄带铸轧工业化应用的企业进行了少量的研究工作。

在双辊薄带铸轧过程中,钢液在极短的时间内便完成了从液态至固态的转变,该转变过程涉及多个工艺参数,且工艺参数之间相互耦合。因此,实现多相多场耦合快速凝固过程的稳定协同控制,使双辊薄带铸轧工艺过程控制极为复杂<sup>[16]</sup>。此前受限于双辊薄带铸轧及其配套技术均处在研究探索阶段,与控制策略相关的研究多针对实

验性质铸机,对铸轧力、辊缝、拉速、熔池液位等参数进行控制系统建模,并通过优化控制算法抑制浇铸过程的参数波动.随着双辊薄带铸轧工业化技术应用实践的不断深入,双辊薄带铸轧工艺过程控制相关的研究得到拓展.

高精度的熔池液位控制是连续稳定生产的基础.目前普遍认为布流、拉速是影响液位控制的主要因素,但铸轧力、温度等参数的变化也会对熔池液位的控制过程产生明显影响.为解决多参数变化对熔池液位控制过程的扰动问题,研究人员将自学习优化算法、自适应遗传算法等多种智能优化算法应用到液位控制策略的设计过程中,有效抑制了液位波动,提高了生产一致性和产品质量<sup>[17]</sup>.基于双辊薄带铸轧熔池特点,机器视觉技术因其占用空间小、非接触式、高精度的特性,已成为双辊薄带铸轧熔池液位的主要检测方法.研究人员通过将图像处理与计算机视觉算法相结合,实现了液位的实时检测,为进一步增强生产过程的稳定性提供了控制基础.

辊缝与铸轧力控制过程作为核心工艺环节,其调节精度对铸带厚度稳定性及产品质量起着决定性作用.在早期的辊缝与铸轧力控制系统设计过程中,存在对耦合关系认识不足、对周期性干扰预测能力弱等问题,这些问题对工艺过程的稳定性产生不利影响.为解决以上问题,齐春雨等<sup>[18]</sup>引入多种技术手段优化辊缝与铸轧力的控制过程.以改进型粒子群优化算法为例,该算法具有快速收敛特性与全局搜索能力.在生产过程中,它能够实时、动态地对各类关键变量进行调整,确保系统稳定.Browne等<sup>[19]</sup>将糊状区纳入建模考量范畴,构建薄带铸轧的降阶模型,在此基础上进一步结合迭代学习算法,成功抑制了因周期性干扰导致的铸带厚度波动,提升了铸带厚度的均匀性.

在工业化生产过程中,为保证最终产品的规格与质量稳定,需要开发出能够协同全流程工艺参数的控制策略,并建立多级闭环控制系统,以实现各个参数的统筹控制.文献[18,20]结合相关工业实践,提出流量、液位与铸轧力等关键参数的耦合模型,并依此优化工艺过程.在国外,一种新的数据驱动建模方法也在近年来被应用于双辊薄带铸轧的生产过程,用以解析不同工艺参数间关系,为生产操作提供建议与指导<sup>[21]</sup>.此外,针对侧封、夹送辊等关键部件的控制建模研究不断得到完善,有力推动了双辊薄带铸轧工业

化的进程.

## 2 铸轧产品工艺与技术

双辊薄带铸轧的短流程近终成形工艺特征,使得钢材的化学冶金和物理冶金成为高度一体化的过程,并使其合金体系、工艺流程、生产组织、工艺控制和产品质量性能形成强耦合关系.与常规流程相比,铸轧薄带缺少反复变形再结晶和往复加热相变过程,很大程度上保留了铸态组织特征,即使对部分需进行后续加工的产品也将产生明显的组织遗传效应<sup>[22]</sup>.在此情况下,带钢的组织调控和强韧化机制与常规产品产生较大区别,基于控制冷却条件下的铸态组织调控变得更为重要.这需要进行与铸轧工艺相匹配的特殊合金成分设计,其中在常规流程下对基体组织性能影响较小的夹杂物控制也成为铸轧产品成分设计中不可忽略的内容.

铸带化学成分体系中的基体合金元素、气体杂质元素、非金属夹杂物等成分组元的设计和协同调控,对浇铸工艺、铸坯质量、材料力学性能、连铸工艺稳定性以及生产组织均具有显著影响.例如,铸轧工艺下包晶区边界移动明显,并叠加了薄带对裂纹的敏感性,使铸轧普碳钢的碳含量与同级别常规产品明显不同;非金属夹杂物除了对铸轧碳钢显微组织具有积极调控作用外,对铸辊表面传热状态也有重要影响,进而一定程度上决定了铸带成形质量;另外,钢液中夹杂物反应还涉及耐材系统的侵蚀、浇铸工艺的顺行和冶炼工艺控制等问题.

包括合金元素、杂质元素、夹杂物在内的成分控制以及换热系数、铸轧力、拉速等铸轧工艺参数控制是双辊薄带铸轧带钢质量性能控制的两条密不可分的主线.通过合理调节铸轧参数,可以显著改善薄带的表面质量,减少包括夹渣、裂纹在内的缺陷的发生.在铸轧工艺参数控制中,温度控制扮演着核心角色;通过精确调节铸造过程中的热输入与冷却速率,可以有效减少铸带表面缺陷,并显著提升产品性能与均匀性.铸轧工艺过程的温度精准控制,以及实时调节铸造及轧制工艺参数的控制能力,是有效改善铸带表面光洁度、确保生产过程产品质量稳定性的核心要素.

特别需要指出的是,铸轧薄带对裂纹具有更高的敏感性,形成机理更为复杂.薄带表面微裂

纹的形成与合金成分、冷却换热条件、材料组织结构及外部应力密切相关.因此,优化冷却技术和连铸工艺对减少微裂纹至关重要.进一步优化合金成分及连铸参数,可以显著提升低碳钢的抗裂性能和力学性能.此外,氧化对双辊薄带铸轧低碳钢表面裂纹的形成有显著影响.通过合理控制氧化层的形成过程及其厚度,可有效降低表面裂纹的产生<sup>[23]</sup>.

在铸轧薄带品种钢的开发和生产中<sup>[24]</sup>,在进一步体现其工艺先进性优势的同时,也面临一些新的产品技术问题需要解决.双辊薄带铸轧为耐候钢的生产开辟了新的途径.江苏沙钢集团双辊薄带铸轧工艺研究表明,通过调节连铸温度和冷却速率,能够有效改善耐候钢的微观结构,进而显著提升其抗腐蚀性能和力学性能.在连铸过程中,关键参数的精确控制对耐候钢生产中合金元素的均匀分布和微观组织的优化至关重要.传统硅钢的生产工艺相对复杂,而双辊薄带铸轧技术通过简化生产流程,提供了一种更加简便、高效的制造途径.通过优化连铸过程中的温度场和冷却速度,可以有效提高硅钢的磁感应强度并降低铁损.通过精确控制辊缝和铸轧力,可改善硅钢的晶粒取向和尺寸,从而显著提升其磁性能,同时减少连铸过程中产生的缺陷,提高产品性能质量.然而,铸轧产品材料性能的获得有赖于对其相应冶金工艺的深入研究与技术突破.双辊薄带铸轧具有不同于常规的特殊冶金现象和机制,因此形成了特殊的合金成分体系和冶金工艺路线,其复杂机理问题有待深入系统研究.

### 3 自主创新进展

通过对双辊薄带铸轧工艺中关键工艺、装备技术、控制策略以及产品技术的综述,铸带稳定成形过程面临的主要理论与技术难题可归纳为以下几个方面.首先,在布流器结构与布流工艺参数耦合作用下,高温熔池内钢液流动行为、凝固特性与传热机理尚未得到充分揭示,这直接制约了熔池、铸辊、冷却水系统高强度均匀冷却体系的建立与稳定维持.其次,侧封系统约束稳定性不足导致铸辊与侧封板界面难以形成可靠的热-力平衡,在高温钢液侵蚀、铸辊与铸带摩擦磨损等多重作用下,侧封板在连续浇铸过程中的稳定性面临严峻挑战.最后,铸轧工艺参数(包括熔池液位、浇铸温度、铸轧力等)与设备状态参数(涉及结晶辊热膨胀、辊缝等)的动态变化,以及浇铸过程状态变量与控制目标间复杂的非线性、强耦合关系,使双辊薄带铸轧工艺中在线控制策略的优化调整面临诸多挑战.

以双辊薄带铸轧工艺工业化应用为导向,东北大学科研团队立足于双辊薄带铸轧过程高效换热体系的理论难题与复杂工艺参数动态优化控制的工艺难题,在双辊薄带铸轧工业化实践中实现了一系列科学理论与关键装备技术的创新突破,特别是在高温熔池内液态金属流动规律与凝固传热特性<sup>[25]</sup>、熔池/铸辊热-流-固耦合热交换机制<sup>[26]</sup>、复杂服役工况下侧封板热力特性<sup>[27]</sup>、控制策略<sup>[20]</sup>、产品技术<sup>[28]</sup>等领域取得了显著突破,如图4所示.

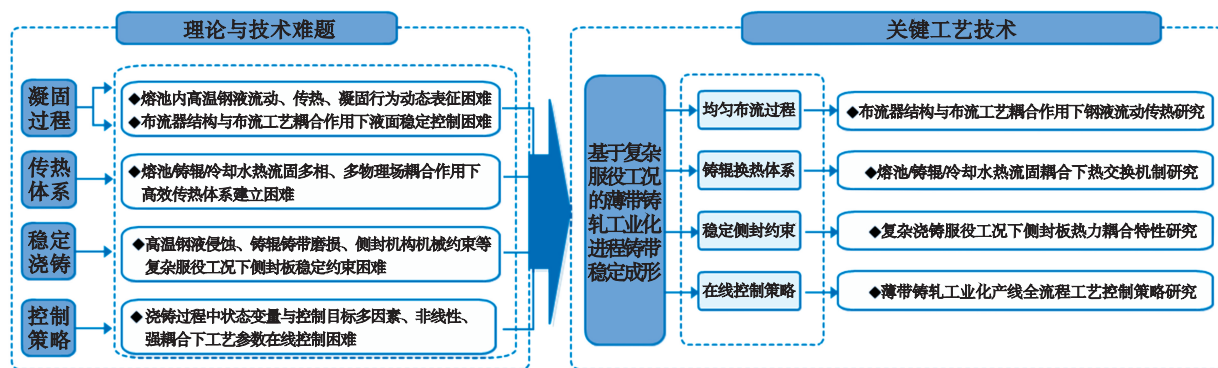


图4 双辊薄带铸轧工艺关键技术研究流程

Fig. 4 Key technology research process of twin-roll strip casting

#### 3.1 高温熔池内液态金属流动规律与凝固传热特性

通过建立布流器、铸辊和侧封板组成的熔池区域的有限元模型,分析研究了不同工况下高温

金属液的流动、凝固与传热特性,如图5所示.高温熔融钢液进入布流器空腔后,在布流器内部缓冲槽的作用下,钢液的冲击力得以降低.其中,经布流器对钢液的缓冲与分配作用,熔池液位波动

平均值控制在 1 mm 以内.在钢液、侧封板与铸辊三相接触区位置,由于布流器侧面出钢口的分流作用,钢液的活跃度显著提高,熔池液位波动峰值控制在 2 mm 以内,从而确保高温钢液在熔池内的均匀布流,实现铸带宽度方向的均匀凝固.研究进一步阐明了熔池区域沿铸辊圆周方向的凝固坯壳分布规律:与传统的连铸工艺相比,凝

固坯壳的稳定生长和厚度波动属于连铸功能的实现,而快速生长阶段则属于轧制功能的实现.基于布流器结构与布流工艺的耦合研究,对降低双辊薄带铸轧过程中的熔池液位波动提供了有效调控手段,对改善铸带表面质量、提高连铸过程工艺稳定性具有实际应用价值.

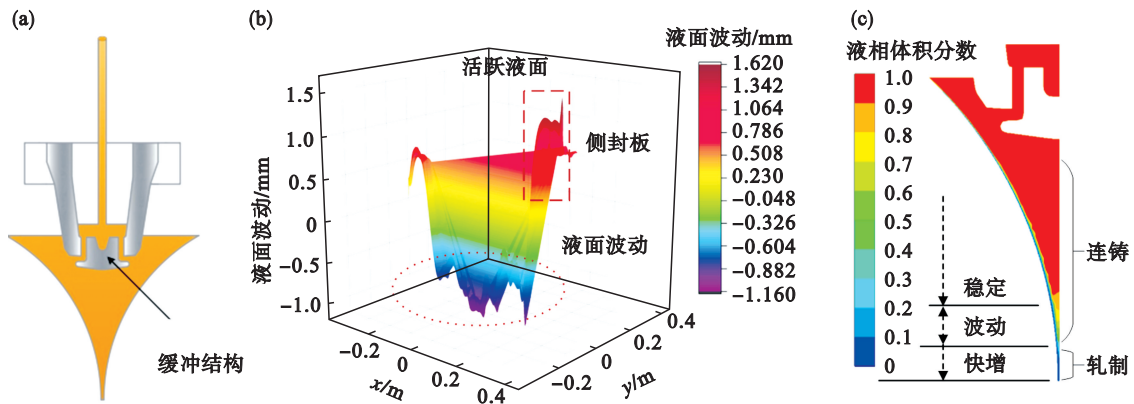


图 5 布流工艺对双辊薄带铸轧过程熔池液位波动及金属液凝固特性的影响

Fig. 5 Influence of flow distribution process on molten pool level fluctuation and solidification characteristics of metal liquid during twin-roll strip casting process

(a)—典型布流器结构; (b)—熔池液面波动; (c)—金属液凝固特性.

### 3.2 熔池/铸辊热流固耦合下热交换机制研究

以双辊薄带铸轧过程结晶辊为主要研究对象,采用有限元模拟与实验验证相结合的方法,建立了高温熔池与铸辊接触区圆周方向的非线性接触热阻模型,研究了铸辊全周期服役过程中的温度分布与热变形特性,如图 6 所示.通过合理布置铸辊内部水通道,将与熔池接触区域的铸辊峰值温度控制在 360 °C 以下,铸辊轴向温度偏差控制在 ±10 °C 以内,实现了铸带沿着铸辊宽度方

向的均匀凝固.研究表明,对于直径为 500 mm 的铸辊,在高温熔池接触位置处,铸辊表面峰值热变形达到 300 μm.基于理想铸带形状和铸辊的热变形规律,构建了铸辊三维轮廓分布的动态调控体系.相关研究为优化双辊薄带铸轧工艺中铸辊结构设计提供了理论指导,对改善铸带板形质量、提高双辊薄带铸轧工艺稳定性与生产效率具有潜在应用价值.

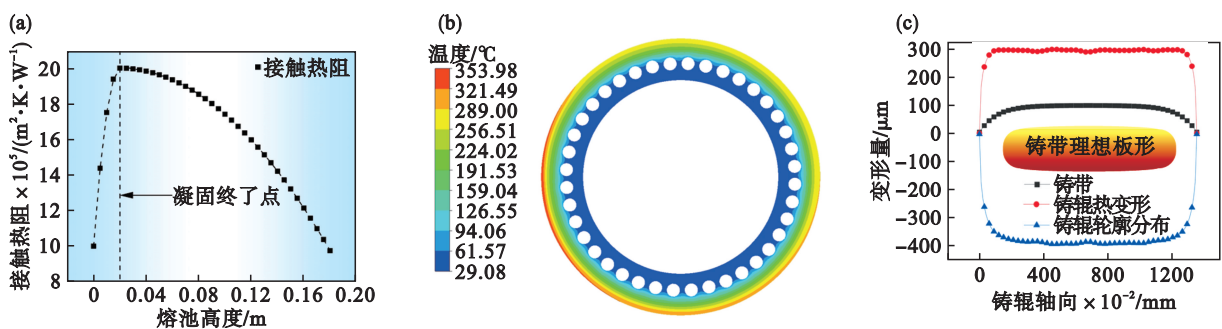


图 6 基于熔池与铸辊接触界面非线性热阻分布的铸辊温度与热变形特性

Fig. 6 Temperature and thermal deformation characteristics of casting roller based on the nonlinear thermal resistance distribution at the contact interface between the molten pool and the casting roller

(a)—界面接触热阻分布; (b)—铸辊圆周方向温度; (c)—基于理想铸带板形与铸辊热变形的铸辊轮廓分布.

### 3.3 复杂服役工况下侧封板热力特性研究

研究明确了侧封板在服役过程中经历的复

杂温度与应力状态.侧封板在实际工况下的服役效果与浇铸过程中的应力分布如图 7 所示.一方

面,侧封板直接接触高温熔融金属,使得接触区受到钢液高温侵蚀;另一方面,侧封板与铸辊及凝固坯壳之间会产生摩擦,引发接触磨损.因此,要求侧封板材料应具有耐侵蚀性及高耐磨性,以承受钢水的高温侵蚀及铸辊与铸带相对摩擦引起的磨损.此外,侧封板在浇铸过程中,工作面与高温熔融金属直接接触,温度高达1 200 °C以上;而非工作面则暴露在周围空气中,温度低至

100 °C以下.侧封板厚度方向的巨大温差导致其始终承受较大的热应力.基于侧封板物性参数对温度及热应力影响规律的研究,改善侧封板受力方式、提升侧封板耐侵蚀及耐磨特性,将显著降低高温熔体与侧封板接触区域的峰值热应力.这对于延长侧封板的使用寿命、提高双辊薄带铸轧工艺稳定性具有重要意义.

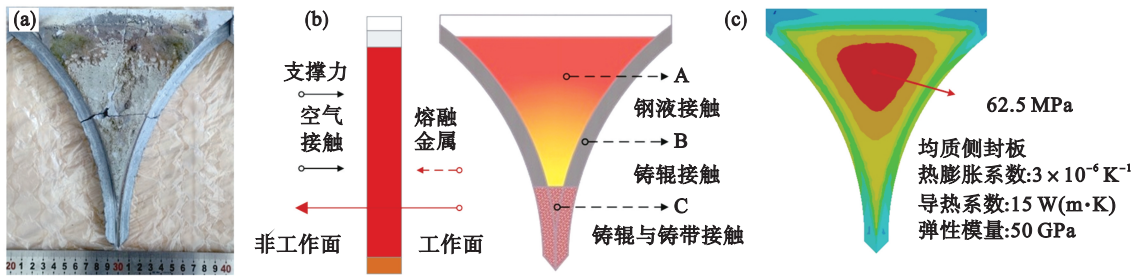


图7 基于实际服役性能的侧封板热力特性研究

Fig. 7 Research on the thermal characteristics of side dams based on actual service performance

(a)侧封板服役效果;(b)侧封板功能性分区;(c)侧封板应力分布.

### 3.4 双辊薄带铸轧产线全流程工艺控制策略

双辊薄带铸轧开浇过程是决定能否实现顺利浇铸的关键.在这个过程中,需要同时兼顾进出熔池钢流量匹配、熔池稳定建立以及铸轧力合理调控3个控制目标.进出熔池的钢流量匹配是熔池稳定控制的前提,流量不匹配时熔池无法稳定,严重时会导致熔池溢出等后果;在建立熔池的过程中,若熔池液位持续波动,则熔池端部易凝结冷钢,冷钢脱落后会造成铸带断裂;开浇过程中工艺参数变化较大,铸轧力施加不合理轻则引发铸带表面裂纹,重则铸带断裂影响开浇成功率.为实现开浇过程的稳定控制并提高开浇成功率,东北大学数字钢铁全国重点实验室科研团队在大量实践的基础上,开发了以流量-拉速-铸轧力控制为核心的协调开浇控制策略.首先按照大包一中包一布流器一熔池的顺序对钢液的几何形状进行数学建模,通过数学模型将影响流量控制的非线性环节线性化,并进一步将单一的大滞后环节分解为多个小滞后环节,实现注入熔池钢液流量的精确控制;其次根据熔池液位的动态变化过程对拉速进行精确调整,通过施加适当的前

馈控制,在建立稳定熔池的同时,将进出熔池的钢液流量进行快速匹配;最后根据开浇时设备的热膨胀规律以及铸带的高温力学性能,设计铸轧力开浇自动控制策略,对铸带施加合适的铸轧力,保证开浇过程中铸带的产品质量.通过使用该控制策略,开浇后主要工艺参数在2 min内可达到稳态,开浇成功率以及产品成材率得到有效提高.

在开浇阶段结束之后,产线进入稳态浇铸阶段.相较于开浇阶段,稳态浇铸阶段系统主要工艺参数不再作大幅度快速调整,但是为了满足最终产品的规格与质量标准,稳态浇铸阶段对工艺参数的精度控制要求更高.由于双辊薄带铸轧工艺下各主要参数之间呈现强耦合、非线性的特点,且铸带厚度等关键参数的检测存在较大延迟,这使得传统单一变量串联控制手段在施加控制动作时易造成系统失稳,影响铸带质量.为解决此问题,东北大学数字钢铁全国重点实验室科研团队以凝固理论与轧制理论为基础,对大量生产数据进行总结,建立了低碳钢双辊薄带铸轧工艺主要参数耦合计算模型:

$$d = \frac{k_s}{\frac{L}{c} + t_T - t_k - t_l} \sqrt{\frac{\arcsin(h/r) \cdot r}{v} - k_1 - \frac{k_{R1} F}{v^2 F + v k_{R2}}}. \quad (1)$$

式中: $d$ 为铸带厚度,mm; $k_s$ 为凝固系数; $L$ 为钢液凝固潜热,J/kg; $c$ 为钢液比热容,J/(kg·°C); $t_T$ 为

中间包钢液温度,°C; $t_k$ 为中间包至熔池温降,°C; $t_l$ 为液相线温度,°C; $h$ 为熔池液位高度,mm; $r$ 为

铸辊半径, mm;  $v$  为铸机拉速, m/min;  $k_1$  为弯月面系数;  $k_{R1}$ ,  $k_{R2}$  为成形系数;  $F$  为铸轧力, kN. 该模型描述了影响低碳钢铸带厚度的各个主要参数之间的耦合关系. 在某一参数发生变化时, 使用该模型可有效预测铸带厚度的变化趋势, 从而提前对其他参数进行调整, 抑制因参数之间互相影响导致的系统波动, 进而提升产品质量稳定性.

铸带在形成之后, 经过活套段改变运动方向并导出铸机, 此后还需经历轧制、控温、卷取等工序, 最终产出合格的热轧钢卷. 为满足稳定轧制的要求, 通常需要对铸带进行拉速、偏移量和张力等方面的控制. 为实现铸轧过程的稳态控制, 首先需要建立铸带活套运动轨迹模型, 并结合计算结果对活套控制器进行线性化处理, 针对不同产线工况施加前馈控制动作, 实现活套高度与全线速度的稳定控制. 同时, 为保证铸带进入轧机时位置对中且带有一定张力, 进一步开发了轧前夹送辊动态压下控制策略, 根据铸带与辊道中心的偏移程度调整夹送辊对铸带的夹持位置, 并叠加压力补偿算法, 保证夹送辊在对铸带进行有效纠偏控制的同时实现压下力稳定, 进而保证与轧机之间张力稳定, 为轧机的稳定轧制提供条件.

此外, 东北大学数字钢铁全国重点实验室科研团队还根据双辊薄带铸轧工艺特点, 开发了基于侧封寿命控制的侧封压力控制策略、基于力矩控制的铸辊刮扫机构控制策略, 以及基于电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)的熔池液位检测系统等控制方法, 有效保证了双辊薄带铸轧工业化关键技术突破和工艺过程的稳定控制.

基于上述技术创新, 建设了完全自主创新的双辊薄带铸轧生产线, 如图8所示, 并结合双辊薄带铸轧工艺特点, 重点在薄规格产品和特殊钢产品领域开展了相关研究与应用实践, 相继在薄规格低碳钢、电工钢等领域实现产品技术突破.



图8 敬业集团双辊薄带铸轧产线

Fig. 8 Twin-roll strip casting production line of Jingye Group

基于双辊薄带铸轧工艺开展了热轧薄规格带钢产品及冷轧镀锌基板的开发工作. 目前, 已

实现了1.5~1.7 mm薄带的稳态连铸, 进一步通过轧机轧制可获得薄规格的热轧带钢. 基于双辊薄带铸轧流程, 重点开展了无取向硅钢工业化铸带的开发工作; 在冷轧退火过程诱导{100}晶粒异常长大, 利用其遗传性成功制备了强{100}织构无取向硅钢.

## 4 结 语

结合前期研发实践, 双辊薄带铸轧亚快速凝固条件下, 金属熔体的凝固行为与常规工艺存在显著差异, 需深入研究阐明双辊薄带铸轧工艺下特殊冶金行为及原理, 构建基于良好质量控制和稳定生产的合金成分和冶金工艺路线. 形成工艺、装备、冶金、材料一体化协同调控与优化的技术体系, 是双辊薄带铸轧重要的发展方向.

在双辊薄带铸轧产品技术方面, 技术攻关热点和难点在于利用和发挥铸轧亚快速凝固与近终成形优势, 实现产品的元素分布、晶粒组织和织构控制; 并结合特殊钢的成分特点, 充分发挥双辊薄带铸轧凝固高冷速和末端高温塑性变形的特点, 创新冶金、凝固、变形和冷却的双辊薄带铸轧全流程工艺. 解决钢铁材料的塑性、偏析、夹杂、均匀性及能耗等问题, 仍是双辊薄带铸轧工艺开发和产品应用研究的重点.

双辊薄带铸轧工艺涵盖冶金、材料、机械设计、自动化控制等多学科专业, 目前在低成本、高效率、高端高质产品研发与创新方面仍存在诸多提升空间. 综合冶金与凝固过程, 持续优化工艺和装备技术, 发挥钢铁材料快速凝固组织控制方面的流程优势, 实现更长周期稳定连浇、降低铸辊消耗, 获得契合下游用户需求的高端高质产品, 是双辊薄带铸轧后续研究和技术开发的重点, 也是钢铁行业铸轧短流程工艺更具竞争力的核心所在.

### 参考文献:

- [1] Guthrie R I L, Isac M M. Continuous casting practices for steel: past, present and future[J]. *Metals*, 2022, 12(5): 862.
- [2] Campbell P, Mahapatra R, Blejda W, et al. The CASTRIP® process: progress towards commercial strip casting at Nucor Crawfordsville [J]. *Revue De Métallurgie-Cahiers D: Informations Techniques*, 2006, 103(1): 25-31.
- [3] 方园, 张健. 双辊薄带连铸连轧技术的发展现状及未来[J]. *宝钢技术*, 2018(4): 2-6.  
(Fang Yuan, Zhang Jian. Development status and future of twin roll strip casting & rolling [J]. *Baosteel Technology*, 2018 (4): 2-6.)
- [4] 史华跃, 冯庆晓, 董瀚, 等. 沙钢超薄带双辊铸轧工艺及超

- 薄带耐候钢的发展现状[J]. 上海金属, 2020, 42(6): 51-57. (Shi Hua-yue, Feng Qing-xiao, Dong Han, et al. Development status of shasteel's ultra-thin cast strip twin-roll casting and rolling process and weatherproof steel for ultra-thin cast strip [J]. *Shanghai Metals*, 2020, 42(6): 51-57.)
- [5] 蔡常青. 双辊薄带连铸连轧技术的现状与展望[J]. 福建冶金, 2022, 51(1): 50-54. (Cai Chang-qing. Present situation and prospect of twin-roll strip continuous casting and rolling technology [J]. *Fujian Metallurgy*, 2022, 51(1): 50-54.)
- [6] 杨泽曦, 王子铭, 李跃, 等. 双辊薄带连铸熔池内流动、传热与凝固的模拟研究[J]. 炼钢, 2023, 39(4): 48-54. (Yang Ze-xi, Wang Zi-ming, Li Yue, et al. Modelling of flow, heat transfer and solidification in the bath of twin roll strip continuous casting [J]. *Steelmaking*, 2023, 39(4): 48-54.)
- [7] 任三兵, 朱苗勇, 樊俊飞. 薄带连铸新型布流系统的数学物理模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 60-63. (Ren San-bing, Zhu Miao-yong, Fan Jun-fei. Mathematical and physical simulations of the new type feeding system in strip casting [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(1): 60-63.)
- [8] 钟勇. 双辊薄带连铸熔池布流系统的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020. (Zhong Yong. Numerical simulation of distribution system in molten pool of twin roll strip continuous casting [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.)
- [9] Xu M G, Zhu M Y. Physical and computational study of a novel submerged entry nozzle design for twin-roll casting process [J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2021, 28(11): 1390-1399.
- [10] Bai C F, Wang B, Ma J, et al. Modeling effect of cooling conditions on solidification process during thermal cycle of rollers in twin-roll strip casting[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2023, 30(1): 64-73.
- [11] 蒋恩, 刘刚. 双辊薄带连铸铸辊水冷系统数值模拟[J]. 一重技术, 2020(1): 1-4, 48. (Jiang En, Liu Gang. Numerical simulation to water cooling system of casting rolls in twin roll strip casters [J]. *CFHI Technology*, 2020(1): 1-4, 48.)
- [12] 朱光明, 方园. 双辊薄带连铸结晶辊辊形优化[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(4): 28-30. (Zhu Guang-ming, Fang Yuan. Roll profile optimization of twin-roll strip casting rolls [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2007, 19(4): 28-30.)
- [13] Wang W L, Cai D W, Lu C, et al. Formation of deposited oxide film during the sub-rapid solidification of silicon steel droplet and its effect on interfacial heat transfer behavior [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(1): 198-207.
- [14] 刘孟, 宋仪杰, 徐晓虹, 等. 薄带连铸用BN基侧封板材料的性能研究及应用[J]. 耐火材料, 2015, 49(5): 357-360. (Liu Meng, Song Yi-jie, Xu Xiao-hong, et al. Properties and application of BN based side dam materials for thin strip continuous casting [J]. *Refractories*, 2015, 49(5): 357-360.)
- [15] 郭海荣, 李鑫, 李化龙, 等. 薄带连铸用侧封板服役过程中热应力分析[J]. 中国冶金, 2022, 32(4): 27-33. (Guo Hai-rong, Li Xin, Li Hua-long, et al. Thermal stress analysis during service of side sealing plate for thin strip continuous casting [J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(4): 27-33.)
- [16] 张晓明, 张军锋, 刘相华, 等. 双辊铸轧薄带过程中铸速对熔池内温度场的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(7): 759-762. (Zhang Xiao-ming, Zhang Jun-feng, Liu Xiang-hua, et al. Influence of casting speed on temperature field in molten pool during twin-roll strip casting [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2006, 27(7): 759-762.)
- [17] 张文宇, 马宇翔, 巨东英, 等. 双辊铸轧过程金属熔池液面的优化控制[J]. 辽宁科技大学学报, 2016, 39(2): 98-103. (Zhang Wen-yu, Ma Yu-xiang, Ju Dong-ying, et al. Optimal control of molten metal level in twin-roll casting process [J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2016, 39(2): 98-103.)
- [18] 齐春雨, 邸洪双, 张晓明, 等. 双辊铸轧薄带钢铸轧力计算公式及控制模型[J]. 黄金学报, 2001, 3(3): 168-170. (Qi Chun-yu, Di Hong-shuang, Zhang Xiao-ming, et al. Establishment of rolling force formula and process control model for twin-roll strip casting of thin steel strips [J]. *Gold Journal*, 2001, 3(3): 168-170.)
- [19] Browne F, Rees B, Chiu G T C, et al. Iterative learning control with time-delay compensation: an application to twin-roll strip casting [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2021, 29(1): 140-149.
- [20] Chen D, Tang Y, Dou W X, et al. Detecting height of liquid level with computer vision for twin-roll strip casting [J]. *ISIJ International*, 2023, 63(7): 1226-1232.
- [21] Park Y, Cho H. A fuzzy logic controller for the molten steel level control of strip casting processes [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(7): 821-834.
- [22] 袁国, 张元祥, 王洋, 等. 薄带铸轧凝固组织的低能晶界及遗传效应[J]. 钢铁, 2023, 58(9): 157-166. (Yuan Guo, Zhang Yuan-xiang, Wang Yang, et al. Low-energy grain boundaries and their hereditary effects on microstructures in strip casting [J]. *Iron and Steel*, 2023, 58(9): 157-166.)
- [23] 杜锋, 方园. 影响薄带连铸低碳钢带表面微裂纹形成的主要因素[J]. 上海金属, 2012, 34(4): 48-53. (Du Feng, Fang Yuan. Main factors affecting surface micro crack on low carbon steel strip by strip casting [J]. *Shanghai Metals*, 2012, 34(4): 48-53.)
- [24] 王鹤松, 袁国, 曹光明, 等. 双辊薄带连铸低碳微合金钢的铸态组织[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 497-500. (Wang He-song, Yuan Guo, Cao Guang-ming, et al. As-cast microstructures of low-carbon microalloyed steel produced by twin-roll strip casting [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(4): 497-500.)
- [25] Zhang Y S, Li Z L, Tang Y, et al. Research on flow, heat transfer, and solidification characteristics of flow distribution process in the twin-roll casting [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 204: 109215.
- [26] Zhang Y S, Li Z L, Tang Y, et al. Research on temperature field and thermal deformation characteristics of casting rollers in twin-roll casting process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 256: 124005.
- [27] Zhang Y S, Li Z L, Fang F, et al. Numerical analysis and experimental study on side dam temperature and stress field of two-roll casting [J]. *Steel Research International*, 2024, 95(5): 2300748.
- [28] Zhang Y X, Lan M F, Wang Y, et al. Microstructure and texture evolution of thin-gauge non-oriented silicon steel with high permeability produced by twin-roll strip casting [J]. *Materials Characterization*, 2019, 150: 118-127.