

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190555

小方坯连铸-轧钢“界面”技术的发展与应用

王新东¹, 常金宝², 李 杰²

(1. 河钢集团有限公司, 河北 石家庄 050023; 2. 河钢集团钢研总院, 河北 石家庄 050023)

摘 要: 运用冶金流程工程学观点,并结合工厂应用实例对小方坯热送热装技术、直接轧制技术和铸轧型无头轧制技术的发展和应用进行了介绍。以小方坯连铸-轧钢制造流程为例,讨论了冶金制造流程中时间、空间等关键要素的配置方法对整个流程中能量耗散的影响,研究了冶金流程典型耗散系统中物质流、能量流和信息流实现“层流”运行的关键技术以及应用效果。通过理论分析和工厂实例,证明通过优化连铸-轧钢“界面”衔接,建立物质流、能量流、信息流优化的运行网络并且实现高效运行,可以显著降低整个棒线材生产流程的能量耗散,节约大量能源,从而实现降本增效、节能减排、绿色化生产。

关键词: 冶金流程工程学; 连铸-轧钢“界面”技术; 热送热装; 直接轧制; 铸轧型无头轧制

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2020)09-0125-07

Development and application of "Interface" technology
of billet continuous casting-rolling

WANG Xin-dong¹, CHANG Jin-bao², LI Jie²

(1. HBIS Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, Hebei, China;

2. HBIS Group Technology Research Institute, Shijiazhuang 050023, Hebei, China)

Abstract: In this paper, the development and application of hot delivery and charging, direct rolling and endless rolling technology of casting-rolling of billet are introduced with the view of metallurgical process engineering. Taking the process of billet continuous casting and rolling as an example, the key elements which influence the energy dissipation of the process were studied and the key technologies to realize "laminar flow" operation of material flow, energy flow and information flow in the typical dissipative system of the metallurgical process were discussed. Through theoretical analysis and factory examples, it is proved that by optimizing the "interface" connection of continuous casting and rolling, establishing the optimized operation network of material flow, energy flow, and information flow and realizing efficient operation, the energy dissipation of the whole process can be significantly reduced, a large number of energy sources can be saved, to realize cost reduction, efficiency increase, energy conservation, and emission reduction, and green production.

Key words: metallurgical process engineering; continuous casting-rolling "Interface technology"; hot transferring and hot charging; direct rolling; continuous casting-endless rolling

“界面”技术是指制造流程中相关制造单元(工序)之间的衔接-匹配、协调-缓冲技术以及相应的装置、网络和调控程序等,其内涵不仅包括工艺、装置,而且包括生产要素在时间-空间的配置、运行调控等一系列技术与手段,进而优化流程中的物质流、能量流和信息流的运行^[1]。对于小方坯连铸-轧钢“界面”技术而言,则指在以小方坯连铸-轧钢为特征的钢铁冶金制造流程中,连铸工序和轧钢工序之间的衔接-匹配技术,以及对应的设备、控制软件等。连铸-轧钢“界面”技术除了涉及 2 个工序的生产工艺

和装备外,还包括 2 个工序之间的时间-空间要素配置、物质流和能量流的运行与调控技术和方法。小方坯连铸-轧钢“界面”技术主要研究在连铸-轧钢的工序衔接中物质流、能量流和信息流的优化调控技术,实现优化的物质流匹配,降低整个流程的能量耗散,同时迅速准确地传递信息流,从而实现高效率、低能耗、绿色化、智能化生产。

随着钢铁流程绿色制造的推进,国内钢铁企业开展了积极的绿色制造创新和实践,行业内对冶金全流程一体化控制的研究逐渐深入^[2-4]。从冶金流

程工程学角度出发,通过研究小方坯连铸-轧钢的“界面”技术,将产品的生产流程中各生产单元的先进技术进行集成应用并达到时间、物流、温度要素的协调和稳定,可将生产过程和产品质量实现最优化,并可以推广应用到长型材生产流程之中。冶金流程“界面”技术作为优化钢铁流程、降低能源消耗和废气污染的有效途径,行业内对其研究和应用也逐渐深入^[5-6]。

随着理论研究的进展、工艺的创新和装备的进步,小方坯连铸-轧钢“界面”技术的发展和运用大致可以划分为钢坯热送热装技术、小方坯直接轧制技术、小方坯铸轧型无头轧制技术 3 个阶段。

第一阶段:以钢坯的热送热装和定重供坯技术的研究及应用为特征。中国连铸坯热送热装工艺的应用始于 20 世纪 80 年代,原武钢率先进行了工艺试验,随后,国家大力推广连铸坯热送热装工艺。20 世纪 90 年代,宝钢、唐钢、邯钢、鞍钢等多家国内企业相继采用了这项技术,2000 年开始,这一技术开始在国内钢厂普遍推广使用^[7]。钢坯热送热装技术的目标是降低钢坯加热炉燃耗,降低加热烧损,提高产品成材率,从而降低生产成本。其采用的手段主要有汽车和铁路保温运输、增设专用的钢坯热送辊道、进行炼钢轧钢一体化调度等。在此阶段同时发展出了小方坯定重供坯技术,即根据产品的不同规格,通过优化钢坯的质量(重量),实现定重供坯,来提高棒材的定尺率^[8]。

第二阶段:随着冶金流程工程学理论研究和运用技术的发展,小方坯连铸-轧钢界面优化程度不断提高,全流程的能量耗散逐渐降低,钢坯热装温度逐渐提高。当钢坯送达加热炉入口的温度达到 900℃ 以上时,小方坯直接轧制技术开始具备可行性。该技术彻底取消了轧钢加热炉,钢坯从连铸机直接送到轧机进行轧制,进一步降低了燃耗成本,并且显著降低了废气排放。

第三阶段:随着冶金装备技术的不断进步,高拉速连铸机、新型高刚度轧机的出现为小方坯铸轧型无头轧制技术的实际应用奠定了基础。这项技术的特征为连铸机由过去的低拉速(2~3 m/min)、多机多流、钢坯切割定尺的生产模式转变为高拉速(6~7 m/min)、单机单流的连续生产模式,并且连铸机和轧机直接衔接,中间钢坯不切断。该技术最大程度地降低了连铸-轧钢流程的能耗、减少了废气污染、彻底消除了非定尺产品、可实现全定尺交货,显著降低了生产成本。

1 小方坯热送热装和定重供坯技术

1.1 热送热装和定重供坯的冶金流程工程学原理

从冶金流程工程学原理来看,以螺纹钢为代表产品的小方坯连铸-轧钢制造流程动态运行过程的物理本质为:以铁素流为代表的物质流(其转变过程为钢水—铸坯—棒材)在以钢坯热焐为主的能量流的驱动和作用下,按照设定的生产调度指令,沿着特定的“流程网络”(工艺总图等)作动态-有序的运行,同时伴随同步的信息流的传递,以期实现生产过程和产品质量稳定、高效率、低成本和节能减排等多个目标的优化,从而建立界面良好、绿色化的冶金生产流程。

钢坯不同热装温度下每提高 100℃ 所增加的热焐如图 1 所示。根据冶金学原理,由于钢坯加热时在 700~800℃ 温度区间金属将发生相变,吸收较多的热能,造成大量的燃气消耗。钢坯在 700~800℃ 加热时,每升高 100℃ 所需的热焐差为 100~400℃ 温度区间的 1.80~2.31 倍,因此,热装温度大于 800℃ 时可以显著地减少加热炉的燃气消耗,节省大量能源。

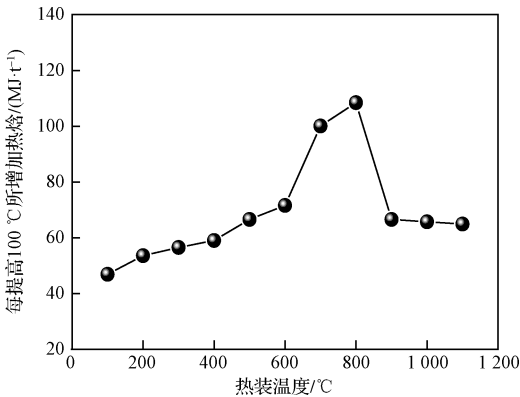


图 1 不同钢坯热装温度下每提高 100℃ 所增加热焐
Fig.1 Increase of enthalpy of billet at different hot charging temperatures for every 100℃ increase

从经典热力学角度分析,连铸-轧钢系统内的物质流和能量流始终和所处的外部环境进行着能量交换,因此是一种开放的、不平衡的、不可逆的、由连铸工序和轧制工序通过非线性组合构成的耗散结构^[9]。小方坯连铸-轧钢制造流程是一类典型的动态开放系统,物质流和能量流的持续输入/输出是此开放系统的基本现象,在此流程中伴随的能量耗散过程是其基本特征。耗散过程中能量耗散的多少及其形式取决于从连铸到轧钢的流程中物质和能量流

经的耗散结构和运行程序的合理程度。因此,为了降低该流程中的能量耗散,必须提升耗散结构以及运行程序的合理程度,流程需要输入“外力”,使此流程的运行有序度得到提升。具体来说,此“外力”即为小方坯连铸-轧钢工序衔接“界面”优化所采取的一系列工艺的、设备的、信息的技术、装备和方法,通过这种手段给此开放的、动态的流程输入少量的能量,换取流程整体耗散的大幅度降低。能量耗散的降低在整个连铸-轧钢生产流程中的具体表征为钢坯在整个输送过程中温度降低值的减少。

1.2 小方坯热送热装和定重供坯技术应用案例

定重供坯技术即根据产品的品种规格和定尺长度制定出优化的钢坯质量(重量),并且采取有效措施保证钢坯质量稳定,从而减少非定尺产品的数量。定重供坯技术的核心是优化钢坯质量,稳定钢坯质量。其基础技术包括高精度称量磅的设计安装、铸坯不同机流识别技术、坯重跟踪技术、铸坯定尺切割技术、铸坯称重技术、铸坯跟踪技术、精确火焰切割技术、高温连铸坯的输送技术等^[10]。

河钢集团唐山钢铁公司的高效棒材生产平台集成应用了小方坯热送热装技术和定重供坯技术,通过控制生产节奏,确保物质流有序运行,从而降低各种能源消耗,实现高效低成本的生产。该生产平台集成了时间流控制技术,缩短了生产周期;集成了物质流控制技术,实现了从方坯到轧制的物质层流运行;集成了温度控制技术,实现了全工序温度损失最小化,减少了热能在开放空间的散失,从而使能量利用最大化,提高了钢坯热装温度,降低了能源消耗,具体指标如下^[11-13]:

(1)方坯在入加热炉前的热装温度达到 820~870℃,最高可达到 900℃;

(2)小方坯连铸机安装了铸坯称重设备,铸坯单根测量精度达到了 0.2%;

(3)通过强化钢水供应、控制中间包液面高度,每月钢坯定重率保持在 72%~74%,班次定重率最高达到 88.77%;

(4)采用定重供坯后与定尺供坯对比,产品的非定尺总量降低为原来的 40%;

(5)定重供坯技术使用后轧钢成材率平均提高 0.15%。

2 小方坯直接轧制技术

随着冶金流程界面优化技术的不断进步,开放空间中的耗散能量回收和利用技术水平不断提高。

当冶金流程中能量耗散降低到一定程度,钢坯送达目的地时表面温度达到 900℃以上时,钢坯热送热装进一步发展成小方坯直接轧制技术。该技术将连铸后带有足够余热的铸坯不经过轧钢加热炉,直接送入轧机进行轧制,钢坯不经加热炉,完全省去了加热炉的燃料消耗,可以大幅度地节省能源,降低二氧化碳的排放。该技术在国内外已经有企业投入生产^[14]。

在小方坯直接轧制流程中,为实现“连铸坯-棒材产品制造”耗散结构中能量耗散的最小化,即制造流程中能耗最低的目标,需要通过集成应用连铸-轧钢“界面”技术来构建物质流的物理流程网,同时需要伴随建立低耗散的能量流程网、同步迅捷的信息传递网,做到以钢水—方坯—棒材为代表的物质流,以金属热焓为代表的能量流,以钢种信息、钢坯标识、产品标识为代表的信息流,实现“三网”协同优化运行^[9]。在采用直接轧制工艺的进程中,由于冶金推力源(连铸机)和拉力源(轧机)之间原有的弹性缓冲器(轧钢加热炉)被取消,因此需要高度重视推力源和拉力源之间的动态-有序、协同-连续的过程,以实现动态运行中物质流的流畅和能量流耗散的最小化。

2.1 实现“层流”运行的关键因素分析

小方坯连铸-棒材轧制流程属于典型的先并联再串联的冶金流程,在此流程中要尽可能实现物质流和能量流的“层流式”运行,避免出现“横向”干扰导致“紊流式”运行^[9]。具体来说,连铸工序是多机流同时浇铸生产的并联生产方式,轧钢工序为单根钢坯、多机流的串联生产方式,此流程需要一个并联到串联的转换,同时保证整体界面为稳定的“层流”运行,减少物质流和能量流横向运输导致的“紊流”产生。

目前的主流小方坯连铸机生产模式从 4 流到 12 流不等,轧机为单支钢坯顺序轧制。传统的钢坯捞钢机从连铸机出坯辊道上移动 1 根钢坯到轧钢送坯辊道,有钢坯减速、停止、位移、重新加速等几个动作周期,整个动作周期在 1 min 以上,并且此钢坯运输过程全程处于开放散热状态,无法保温,是开放空间完全自由散热的状态。因此,需要采用钢坯并流辊道的模式,将来自不同连铸机流的钢坯通过并流辊道实现钢坯单支进入快送辊道,可减少连铸机多流出坯到送钢辊道单根供坯的转换时间,避免温度损失。此外,尽可能采用提高连铸机拉速、减少连铸机流数量的方法,在保证总产能不降低的前提下减

少连铸工序并联运行设备数量,降低“紊流”产生的概率;还可以提高直供钢坯温度,并且降低不同机流之间钢坯由于排序送坯导致的温度差。

综上,实现连铸-轧钢界面实现层流式运行的基础,一是连铸工序和轧钢工序之间生产能力要最佳匹配;二是连铸-轧钢的工艺布局要对应和紧凑。因此,小方坯连铸机-加热炉-热轧机之间工序能力必须实现匹配并固定-协同、层流化运行。对于已经建成的产线需要依照上述原则进行流程布局的改造。

对大多数已经建成的生产线,由于最初建设时没有从冶金流程工程学角度对各个工序界面进行优化,主要问题是连铸工序和轧钢工序存在的方向、距离、中心线差和高度差。当现有生产线的连铸出坯方向与轧制方向相同但不在同一条直线上时,可采用 Z 型布局,解决连铸和轧钢的中心线差问题。当现有生产线的连铸出坯方向与轧制方向呈 90°夹角时,可采用 L 型布置。对于个别生产线连铸出坯方向与轧制方向呈 180°夹角的情况,需要采用 U 型布置,方坯方向调转后运输。不论哪种方式,在转弯半径允许的情况下,并轨转弯辊道方式下钢坯温降要比移钢机、转钢机小很多^[15]。连铸出坯辊道中心线和轧制线存在的高度差优选爬坡辊道方式,比采用钢坯提升机温降小。

对于新建产线,则在设计阶段就需要充分从冶金流程工程学角度去考虑流程布局,提前考虑炼钢-

轧钢界面的优化。重点需要考虑将连铸机出坯辊道与轧机轧制线同一直线、直线距离尽可能缩短、出坯辊道与轧制中心线标高落差要小、炼钢-连铸工序智能衔接优化、连铸-轧钢的多流对单线的工序智能衔接与供坯、连铸与轧制节奏和过程稳定性解决方案,实现小钢坯进入轧机时最低点温度要在 900 ℃以上,并且沿钢坯长度方向上温度波动要小于 50 ℃。

2.2 直接轧制产品性能窄窗口控制

轧制温度的波动会直接造成产品力学性能波动,特别是产品的抗拉强度和屈服强度指标。辽宁科技大学已经开展了直接轧制条件下的窄窗口和大数据应用相关研究^[16]。根据某直接轧制生产线实际测量的大量数据统计分析结果,对于采用控轧控冷工艺强化的钢筋,轧制温度变化与产品性能波动的关系大致为温度变化 1 ℃,性能变化 1 MPa。对于采用钒合金强化工艺的钢筋,温度变化 1 ℃,性能波动 0.2~0.3 MPa。因此,为实现直接轧制条件下产品性能的稳定,需要对轧制温度进行窄窗口控制,并利用适当的补热均温手段对轧制温度进行均匀化处理。

采用传统棒材工艺布局的产线可以采用对钢坯开轧前补热均温或进行中间轧件穿水降温的方式进行温度均匀化改造。现业内的补热方式有火焰补热和电感应补热两种,其补热机理和安装位置均有较大的区别,两种补热方式的对比见表 1。

表 1 火焰补热和电感应补热对比
Table 1 Comparison of flame heating and electric induction heating

参数	火焰补热	电感应补热
安装位置	连铸剪切机至冷床之间辊道	进轧机前的直线段辊道
补热时机	连铸坯头部通过剪切机后进行补热,芯部温度未散出,保住芯部温度和表面高温	连铸坯被送到轧机前进行补热,对表面和角部温度进行补充
补热设备	箱式保温装置内,4 个角部烧嘴,多组	电加热器 2 500 kW×2 组
加热时间	3~5 min	30 s
补热原理	高温火焰直接加热,使表面温度提高,铸坯内部高温难扩散	采用感应加热机理快速升温
补热成本	燃气 3 m ³ /t,氧气 6 m ³ /t	40~50 kW·h/t

2.3 直接轧制应用实例

河钢集团建设了一条螺纹钢直接轧制示范线,该示范线开发集成应用了多项小方坯连铸-轧钢“界面”技术,既可以采用加热炉热装工艺,也可以采用直接轧制工艺。其工艺布局如图 2 所示。该产线投产后取得成绩如下:

(1)165 mm 方坯连铸机从原来的 8 机 8 流改为 6 机 6 流生产,拉速从 2.10 提升到 2.75 m/min,

连铸机产能不变,12 m 定尺铸坯表面温度可以提升 50~60 ℃;安装了增强全程保温的钢坯输送辊道和长距离快速保温辊道,从连铸区钢坯切断位置到轧机入口距离 320 m,钢坯输送时间在 1 min 内送到轧机入口,钢坯表面温降小于 10 ℃。实际测量的具体温度见表 2。

(2)采用工艺窄窗口控制技术后,取 100 个样品进行屈服和抗拉强度检验,同根铸坯产品性能波动

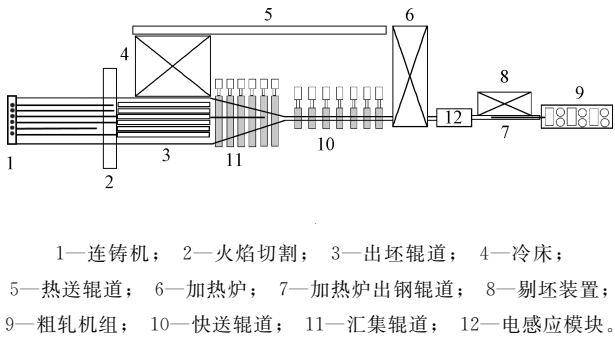


图 2 直轧改造后工艺布局简图

Fig. 2 Layout diagram of direct rolling revamping

小于 10 MPa 的比例不低于 95%。
(3)轧钢工序比采用加热炉降低标煤 30 kg/t;吨钢节约综合成本 30~40 元^[17]。

3 小方坯铸轧型无头轧制技术

小方坯铸轧型无头轧制技术是连铸-轧钢“界面”最新技术的集成应用。为了与钢坯对焊式无头轧制技术区分,该技术被称为“铸轧型无头轧制技术”。该技术综合了小方坯直接轧制和无头轧制的优点。在此工艺流程中,物质流、能量流、信息流在

表 2 钢坯温度测量数据

Table 3 Measured datas of billet temperature

位置	℃			
	拉矫机出口	切割位置	感应炉入口	1 号轧机入口
头部温度	1 100~1 140	920~960	900~980	980~1 070
尾部温度	—	1 030~1 080	970~1 030	990~1 080

连铸-轧钢界面衔接做到了距离最短、传递最迅捷,能量耗散最低。其单流高拉速连铸机取代了多流并联运行的低拉速连铸机,消除了冶金流程中一个重要的“紊流”产生因素,使得物质流和能量流更加容易实现“层流”运行。

小方坯铸轧型无头轧制技术的主要优点有:

(1)在小方坯铸轧型无头轧制流程中,钢水经连铸机铸造成型后直接连接到轧机进行轧制,取消了钢坯加热炉,显著节约了能耗,简化了工艺,改善了劳动条件。

(2)由于采用了高拉速连铸机单流连续铸轧,钢坯不切断,彻底消除了轧钢工序中的飞剪切头切尾,消除了非定尺材,实现全定尺交货,提高了金属收得率,生产效率提高。

(3)消除了钢坯切断后逐根咬入轧机轧制时轧件头尾对轧钢设备的冲击负荷,延长了设备使用寿命。

小方坯铸轧型无头轧制工艺的典型布局如图 3 所示,其中钢坯切断区域仅在下道工序出现事故状态时应急投入使用。

小方坯铸轧型无头轧制技术的核心是高拉速

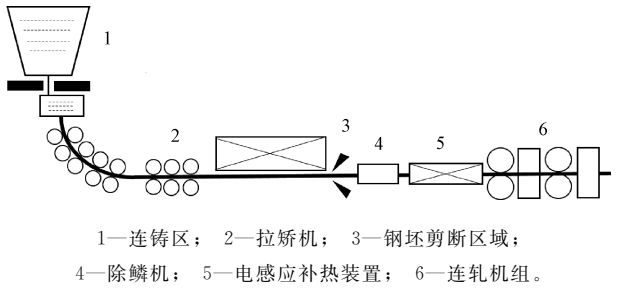


图 3 小方坯铸轧型无头轧制流程布局
Fig. 3 Layout of billet continuous casting and endless rolling process

连铸机。该类型连铸机采用了新型的免维护振动系统和二次冷却系统,结晶器系统不需要水套组件和复杂的调整程序,最新型的高效连铸机当采用边长为 200~220 mm 方坯时最高拉速可达 7.5 m/min;当采用边长为 180 mm 多边形连铸坯时,拉速稳定在 7 m/min,年产能可达到 70 万 t^[18]。根据上述参数测算了采用小方坯铸轧型连铸连轧的生产能力后,建议与初炼炉的匹配关系见表 3。

表 3 小方坯铸轧型连铸连轧连铸机与初炼炉产能匹配关系

Table 3 Matching relationship between capacity of continuous caster and steelmaking furnace in billet continuous casting and rolling process

坯形/mm	铸坯断面/mm ²	拉速/(m·min ⁻¹)	铸机小时产能/(t·h ⁻¹)	浇铸时间/min	初炼炉出钢量/(t·h ⁻¹)
180	32 400	6	91	60	91
150	22 500	6	63	60	63
140	19 600	6	55	55	55
130	16 900	6	48	47	47

小方坯铸轧型无头轧制工艺从连铸到轧制是一条物流线不间断的连续生产,任何一个环节中断都意味着从连铸到轧钢的全线中断,所以此生产工艺对轧机的可靠性提出了极高的要求。因此需要配备高效率、高可靠性、能够长期高稳定性工作的轧机。采用这种工艺布局的轧机集成了目前棒线材轧制的最新技术。轧机前有电感应加热炉用于补热;轧机采用平立交替高刚度轧机,带有“轧槽磨损-辊缝调整”全自动的闭环自动调整系统;可以实时检测金属秒流量的变化,自动补偿轧槽磨损;装备有快速换辊小车可以实现 15 min 内换辊;精整区域装备在线淬火-回火热处理系统;连铸连轧过程中可以不间断地随意改变最终产品的定尺长度,实现动态全定尺交货。整条产线布局非常紧凑,节省空间^[19]。

现有已建成的棒材铸轧型无头轧制多用于紧凑型短流程的建筑棒材专业生产厂,原料为废钢,电炉冶炼,生产能力为 30~50 万 t/a,生产效率很高,从钢水到成材生产的过程低于 15 min,生产过程连续稳定,不间断的连铸坯一直在进行轧制。此工艺流程生产低成本的螺纹钢产品,可辐射周边数百公里内市场。对于年产 50 万 t 以上的小方坯铸轧型无头轧制生产线,根据公开报道,目前国内已经在山西以及广西分别有民营钢铁企业引进了设计能力为 70 万 t 的达涅利 MIDA 生产线,采用边长为 180 mm 的多边形钢坯,连铸机拉速为 6~7 m/min,采用高炉-转炉长流程工艺,该生产线预计 2020 年投产。

4 结论

(1)“界面”技术通过对冶金制造流程的时间-空间配置要素进行集成优化,从而实现整个流程“动态-有序”和“连续-紧凑”运行,这是降低整个流程能量消耗、提高产品品质和降低废弃物数量的有效途径。

(2)“界面”技术研究的核心是建立冶金制造流程中物质流、能量流和信息流各自的流程网络并实现协同-有序运行,此方法可以拓广应用到烧结-炼铁-炼钢等冶金流程中各个工序衔接界面,使整个宏观流程的能量耗散降低,从而促进钢铁行业的节能减排、绿色制造。

(3)冶金流程工程学是在宏观层次对冶金流程进行解析与优化的科学,这种从宏观高度对整个流程进行解析、优化控制的科学及其在钢铁生产中的应用,对于整个冶金行业实现能源高效转换和利用、

消纳处理大宗社会废弃物的功能有重大的指导和现实意义。

参考文献:

- [1] 徐安军. 冶金流程工程学基础教程[M]. 北京:冶金工业出版社,2019. (XU An-jun. Basic Course of Metallurgical Process Engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019.)
- [2] 王新东,田京雷,宋程远. 大型钢铁企业绿色制造创新实践与展望[J]. 钢铁,2018,53(2):1. (WANG Xin-dong, TIAN Jing-lei, SONG Cheng-yuan. Innovative practice technology and outlook in large iron and steel enterprise green manufacturing[J]. Iron and Steel,2018,53(2):1.)
- [3] 王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁,2015,50(9):1. (WANG Guo-dong. Technology innovation and development direction of iron and steel industry[J]. Iron and Steel, 2015,50(9):1.)
- [4] 王国栋. 钢铁全流程和一体化工艺技术创新方向的探讨[J]. 钢铁研究学报,2018,30(1):1. (WANG Guo-dong. Discussion on innovative direction of entire process and integrated process technology of steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2018,30(1):1.)
- [5] 石鑫越,韩伟刚,郦秀萍,等. 排队论在连铸-轧钢区段加热炉出坯节奏中的应用[J]. 钢铁,2018,53(5):96. (SHI Xin-yue, HAN Wei-gang, LI Xiu-ping, et al. Application of queuing theory in rhythm of billet of CC-rolling section[J]. Iron and Steel, 2018,53(5):96.)
- [6] 常金宝,郝华强,么洪勇,等. 小方坯连铸机与棒材轧机之间的“界面”技术优化[J]. 中国冶金,2017,27(12):77. (CHANG Jin-bao, HAO Hua-qiang, YAO Hong-yong, et al. Optimization for Interface technology between billet caster and bar rolling mill[J]. China Metallurgy, 2017,27(12):77.)
- [7] 赵海峰. 连铸坯热送热装工艺技术应用研究[C]//第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2011:3217. (ZHAO Hai-feng. Study on the application of hot delivery and hot charging technology of continuous casting billet [C]//Proceedings of the Eighth (2011) Annual Meeting of China Iron and Steel. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2011: 3217.)
- [8] 常金宝,王欣,郝华强. 定重供坯在方坯连铸中的应用[J]. 连铸,2013,38(6):34. (CHANG Jin-bao, WANG Xin, HAO Hua-qiang. Application of stationary weight of billet cast[J]. Continuous Casting, 2013,38(6):34.)
- [9] 殷瑞钰. “流”、流程网络与耗散结构——关于流程制造型制造流程物理系统的认识[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(2):136. (YIN Rui-yu. "Flow", flow network and dissipative structure—understanding of the physical system of manufacturing process of process manufacturing type[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018,48(2): 136.)
- [10] 常金宝,张朝发,韩志杰,等. 一种新型铸坯定重切割技术[J]. 金属世界,2013(5):74. (CHANG Jin-bao, ZHANG Chao-

fa, HAN Zhi-jie, et al. A new fixed-weight cutting technology for casting slab[J]. Metal World, 2013(5): 74.)

[11] 王新东,常金宝,李双武,等. 高效率、低成本洁净钢制造平台技术集成与生产实践[J]. 炼钢,2012,28(4):1. (WANG Xindong, CHANG Jin-bao, LI Shuang-wu, et al. Technology integration and production practice of high efficiency and low cost clean steel production platform[J]. Steelmaking,2012,28(4):1.)

[12] 常金宝,冯润明,王欣. 低成本、高效率洁净钢制造平台的集成技术[J]. 河北冶金,2011(3):45. (CHANG Jin-bao, FENG Run-ming, WANG Xin. Integrating technique for low cost and high efficiency manufacture platform of clean steel[J]. Hebei Metallurgy, 2011(3):45.)

[13] 殷瑞钰. 小方坯铸机-棒材轧机之间“界面技术”优化:铸坯高温按序直接装炉技术[C]//2014 年全国炼钢-连铸生产技术会论文集. 唐山:中国金属学会,2014:427. (YIN Rui-yu. "Interface technology" optimization between billet and bar rolling mill: High-temperature sequential direct-loading technology of casting blank[C]//Proceedings of the National Steel-making and Continuous Casting Technology in 2014. Tangshan: The Chinese Society for Metals,2014:427.)

[14] 刘相华,刘鑫,陈庆安,等. 棒线材免加热直接轧制的特点和关键技术[J]. 轧钢,2016,33(1):1. (LIU Xiang-hua, LIU Xin, CHEN Qing-an, et al. Key technologies in direct rolling of free-heating for bar and rod mill[J]. Steel Rolling, 2016,33(1):1.)

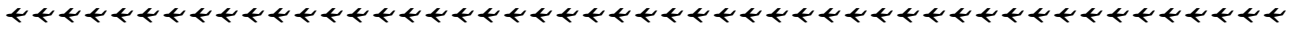
[15] 刘相华,陈庆安,刘鑫,等. 棒线材免加热直接轧制工艺的平面布置[J]. 轧钢,2016,33(2):1. (LIU Xiang-hua, CHEN Qing-an, LIU Xin, et al. Plant layout of direct rolling of free-heating for bar and rod mill[J]. Steel Rolling, 2016,33(2):1.)

[16] 范越,李胜利,艾新港,等. 窄窗口控制及大数据在直轧的应用现状与展望[J]. 中国冶金,2018,28(9):8. (FAN Yue, LI Sheng-li, AI Xin-gang, et al. Application status and prospect of narrow window control and big data in direct rolling[J]. China Metallurgy, 2018,28(9):8.)

[17] 李杰,常金宝,郭子强,等. 棒材直接轧制工艺改造实践[J]. 轧钢,2019,36(3):47. (LI Jie, CHANG Jin-bao, GUO Zi-qiang, et al. The practice of direct rolling for bar and rod mill[J]. Steel Rolling, 2019,36(3):47.)

[18] Keller K, Travaglini C, Cavinato E, et al. The new Micromill Danieli(MiDa) at CMC Arizona—an innovative process for the most competitive production of rebar product[J]. AISTech Proceedings, 2010(s1): 30.

[19] Ahmed M, Toschi F, Masini R, et al. The Winlink® direct rolling mill for efficient and flexible production of long products[J]. SEAIISI Quarterly, 2017, 46(1):23.



(上接第 103 页)

[18] 韩志勇,张明达,徐海峰,等. 高性能汽车钢组织性能特点及未来研究方向[J]. 钢铁,2016,51(2):1. (HAN Zhi-yong, ZHANG Ming-da, XU Hai-feng, et al. Microstructure and performance characteristics of high-performance automotive steels and future research and development directions[J]. Iron and Steel,2016,51(2):1.)

[19] 董瀚,曹文全,时捷,等. 第 3 代汽车钢的组织与性能调控技术[J]. 钢铁,2011,46(6):1. (DONG Han, CAO Wen-quan, SHI Jie, et al. Structure and properties regulation technology 3rd generation of automotive steel[J]. Iron and Steel,2011,46(6):1.)

[20] 胡庚祥,蔡珣,戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海:上海交通大学出版社,2010. (HU Geng-xiang, CAI Xun, RONG Yong-hua. Fundamentals of Materials Science [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press,2010.)

[21] 束德林,陈九磅,凤仪. 工程材料力学性能[M]. 北京:机械工业出版社,2007. (SHU De-lin, CHEN Jiu-bang, FENG Yi. Mechanical Properties of Engineering Materials[M]. Beijing: Mechanical Industry Press,2007.)

[22] 柴蓉霞,郭卫,郭成. XC45 钢热变形行为及微观组织演化模型[J]. 塑性工程学报,2016,23(1):119. (CHAI Rong-xia, GUO Wei, GUO Cheng. Thermal deformation behavior and microstructure evolution model of XC45 steel[J]. Journal of Plastic Engineering,2016,23(1):119.)

[23] XIE Wen-ling, ZHOU Sun-yong, GUO Cui-xia, et al. Research progress in superplasticity of metal material[J]. Hot Working Technology,2014,43(20):15.

[24] 周善佑. 晶界在超塑性变形中的作用[J]. 上海金属:有色分册,1989,10(6):45. (ZHOU Shan-you. The role of grain boundaries in superplastic deformation[J]. Shanghai Metal: Coloured Catalogue,1989,10(6):45.)