

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180177

现代合金钢大方坯连铸机设计特点及生产实践

吴国庆, 邱明罡, 代宗岭, 陈卫强, 张温永
(中冶京诚工程技术有限公司炼钢工程技术所, 北京 100176)

摘要: 中冶京诚工程技术有限公司(以下简称中冶京诚)致力于国产化大方坯连铸机的自主设计和自主创新, 长期以来对于提升铸坯质量的关键技术的研发取得了突破性的进展。介绍了中冶京诚自主设计6机6流合金钢大方坯连铸机的核心技术与关键装备, 系统描述了保证铸坯质量的关键技术的设计特点, 重点阐述了电磁搅拌及轻、重压下技术在改善铸坯内部质量方面的应用情况, 详细介绍了连铸机生产典型高碳磨球钢实际的冶金效果, 指出了大方坯连铸技术的发展趋势。生产实践表明, 恒定拉速下, 确定合理的末端搅拌安装位置和轻、重压下技术实施区间, 优化搅拌及压下工艺参数, 可以显著降低高碳钢大方坯中心偏析及“V”型偏析, 改善中心疏松, 消除中心缩孔。连铸生产310 mm×360 mm断面典型钢种BU($w(C)=1\%$), 稳定拉速约0.5 m/min, 铸坯试样沿厚度方向碳偏析指数为0.93~1.08, 沿纵剖中线方向碳偏析指数为0.95~1.09, 中心疏松不低于行业1级标准(YB/T 4002—2013)。

关键词: 大方坯连铸; 磨球钢; 电磁搅拌; 轻压下; 重压下

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2018)12-0054-08

Design features and production practice of modern alloy steel bloom caster

WU Guo-qing, QIU Ming-gang, DAI Zong-ling, CHEN Wei-qiang, ZHANG Wen-yong
(Steelmaking and Continuous-casting Division, Capital Engineering and Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China)

Abstract: Capital Engineering and Research Incorporation Limited devotes itself to the independent design and independent innovation of the localization bloom caster. For a long time, breakthroughs have been made in the research of key technologies for improving the quality of bloom. The core technology and the key equipment of the 6-strand bloom caster which independently designed by Capital Engineering and Research Incorporation Limited Company were introduced. The design features of key technologies to ensure the quality of the bloom were systematically described. The application of the electromagnetic stirring, the soft reduction and the hard reduction in the improvement of the inner quality of the bloom were expatiated respectively. The practical metallurgical effect of the typical high carbon grinding ball steel was introduced in detail, and the development trend of continuous casting technologies for the bloom production was pointed out. Production practices showed that: at a given speed, ensuring the reasonable position of the final stirring, the reasonable soft reduction and the reasonable hard reduction, the optimized stirring and reduction process parameters could significantly reduce the center segregation and "V" segregation of high carbon steel, improve the center shrinkage and eliminate the center porosity. During the 310 mm×360 mm typical steel BU($w(C)=1\%$) casting process, at the speed of 0.5 m/min, the carbon segregation index along the thickness direction was between 0.93-1.08, and the carbon segregation index along the longitudinal direction was between 0.95-1.09. According to the industry standard (YB/T 4002—2013), the center shrinkage no less than grade 1.

Key words: bloom caster; grinding ball steel; electromagnetic stirring; soft reduction; hard reduction

磨球钢主要用于制造矿山、冶金和水泥等行业使用的耐磨钢球, 具有硬度高、破碎率低、磨耗优良的特点, 对钢材质量要求严格^[1]。国内某耐磨钢球生产企业生产工艺流程为: 转炉→LF→VD→CC(310 mm×360 mm)→加热→中棒轧制→轧制耐磨

钢球或锻造耐磨钢球。

为获得高洁净度和高均质性的高碳磨球钢铸坯组织, 连铸机配备了提升铸坯质量的先进装备及技术, 包括全程无氧化保护浇铸、大容量中间包、弧形管式结晶器、内外弧双单元液压振动装置、组合

式电磁搅拌(M+F-EMS)、凝固传热模型及二冷动态配水技术、连续矫直牌坊式拉矫机组、轻压下(SR)、重压下(HR)控制技术等。这些先进的装备技术结合优化的连铸生产工艺,确保了铸坯具备良好的表面及内部质量。

生产实践表明,末端电磁搅拌以及轻、重压下技术是解决高碳钢大方坯中心偏析与中心疏松、缩孔最为有效的措施,与其有关的设计尤其重要^[2-5]。

1 铸机主要技术特点

1.1 连铸机主要技术参数

典型磨球钢的化学成分(质量分数)见表1。连铸机主要技术参数见表2。

1.2 连铸机主要技术特点

1.2.1 结晶器技术

在结晶器设计上,采用铜银合金管式结晶器和2排足辊支撑装置。根据合金钢大方坯凝固收缩特

性,结晶器设计特点为:(1)选择最佳的水缝结构和铜管的支撑方式,保证水缝的均匀性,通过对结晶器铜管的温度场计算和分析,针对不同钢种分类设定不同的冷却水量,冷却水流速控制为7.5~9.0 m/s,铜管壁厚约为26 mm,使铜管冷热点温度分布合理,结晶器冷却水温差控制为3~6 ℃。(2)结晶器铜管采用抛物线锥度以更好地适应铸坯的收缩,使铸坯在结晶器内均匀冷却并形成适宜的坯壳厚度,减少拉坯阻力;选择适宜的铜管R角设计,对于既生产低碳包晶钢又生产高碳钢的方坯结晶器铜管,推荐R角半径为15~18 mm,兼顾考虑避免不同钢种产生偏离角或角顶裂纹;足辊区采用合理的喷嘴布置及选型,避免产生表面纵裂及角部裂纹。(3)铜管内表面采用镀铬技术,提高铜管的使用寿命。(4)采用高刚度的结晶器水箱设计,使铜管及内水套获得有效的固定支撑,以确保浇铸过程中足够的稳定性,获得最佳的表面质量。

表1 典型磨球钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Typical chemical composition of grinding ball steel %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Al
B3	0.61~0.65	1.77~1.83	0.73~0.78	≤0.020	≤0.008	0.81~0.87	≤0.20	≤0.2	—	0.022~0.038
BU	0.98~1.02	0.24~0.30	1.00~1.06	≤0.020	≤0.008	0.51~0.57	≤0.05	≤0.06	≤0.02	0.032~0.048

表2 连铸机主要技术参数

Table 2 Basic parameters of caster

项目	类型和数值
机型	全弧型连铸机
基本弧半径/m	12
铸坯断面规格/(mm×mm)	310×360
矫直方式	连续矫直
结晶器形式	管式抛物线锥度
振动形式	内外弧双单元、仿弧液压振动
铸坯导向段	活动扇形段+固定扇形段
二次冷却方式	水+汽水雾化、分区独立动态控制
电磁搅拌方式	组合式(外置式结晶器+凝固末端)
铸机长度	约22.4 m(从弯月面到最后1架拉矫辊外弧线距离)
引锭杆形式	挠性、下装、辊道侧面存放
切割方式	火焰切割机
三电控制系统	1级基础自动化+2级过程控制(动态二冷及动态压下技术等)

大方坯结晶器及铜管三维设计分别如图1和图2所示。

1.2.2 全程无氧化保护浇铸

对于合金钢大方坯连铸,从钢包到结晶器必须采用保护浇铸。钢包和中间包之间采用长水口保

护浇铸,中间包和结晶器之间采用整体浸入式水口保护浇铸,在钢包下水口与长水口连接处采取通氩气密封,并且中间包内采用覆盖剂及惰性气体保护措施、结晶器采用保护渣浇铸等,以防止钢水二次氧化和吸气。

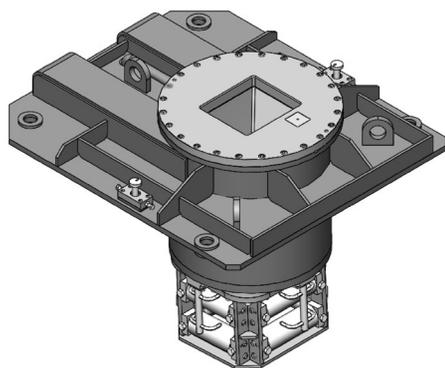


图 1 大方坯结晶器三维设计

Fig. 1 Three-dimension design of bloom mold

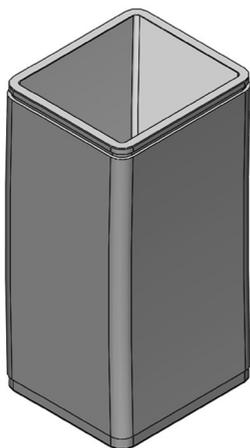


图 2 结晶器铜管三维设计

Fig. 2 Three-dimension design of mold tube

1.2.3 液压振动装置

结晶器液压振动装置由内、外弧 2 个独立的振动单元和 1 个振动底座组成,其振幅范围为 ± 6 mm,频率范围为 30~350 次/min,非正弦系数可在 0~0.4 之间调整。根据不同断面设定不同的振动参数,通过在线调整振频、振幅可控制负滑脱时间、时间负滑脱率及速度负滑脱率等参数均在最佳范围之内,以改善结晶器润滑,提高铸坯表面质量。液压振动装置及单元组成分别如图 3 和图 4 所示。

液压振动技术装备的先进性和典型特点为:(1) 振动参数(振频、振幅和波形)实时可调,可实现振动效果最优化,振动精度可控制在 ± 0.15 mm;(2) 每个单元采用 2 组高精度的预应力板簧导向,各向的偏差小,导向精度高,无机械磨损,寿命长,耐高温性能好;(3) 液压驱动力大,具有高稳定性、可靠性,系统响应快,精度高;(4) 设备无活动铰点,无磨损,无润滑点,振动油缸采用间隙密封,保证长期恶劣条件下使用;(5) 采用计算机仿真和有限元方法进行优化设计,保证系统长期稳定运行。

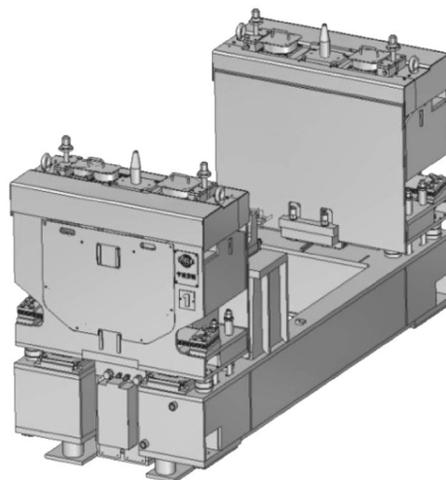


图 3 液压振动装置

Fig. 3 Hydraulic oscillation drive

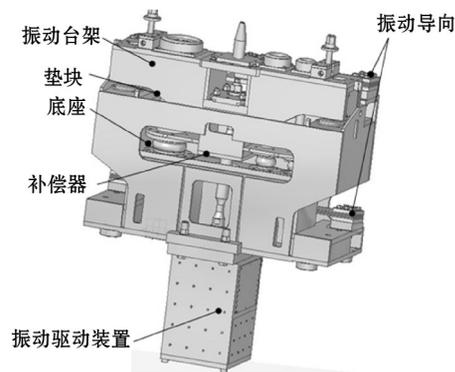


图 4 振动单元组成

Fig. 4 Composition of hydraulic oscillation unit

1.2.4 凝固传热模型及二冷动态配水技术

连铸坯的内部裂纹、表面裂纹、鼓肚、脱方和中心偏析等缺陷与二次冷却有紧密的关系^[6]。中冶京诚依据冶金准则建立方矩坯二维非稳态凝固传热数学模型及钢种高温热、物性参数数据库,并开发相应的辅助模拟计算软件,结合多年来在合金钢大方坯连铸机方面的设计经验及现场红外测温、射钉试验数据不断进行修正,从而为铸机设计提供理论支撑,以确保最终产品质量合格。

凝固传热微分方程为^[6]

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中: ρ 为钢的密度, kg/m^3 ; c 为钢的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t 为铸坯温度, $^\circ\text{C}$; x 为铸坯宽度, m ; y 为铸坯厚度, m ; K 为热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; θ 为时间, s 。

综合考虑钢种、断面、配合拉速情况,连铸机二冷采用 4 分区设计,全水冷却(足辊)+汽水雾化(导向段)冷却方式。针对合金钢大方坯凝固特性,二

冷比水量设定为 0.16~0.25 L/kg,连铸采用弱冷冷却模式,凝固前沿温度梯度小,凝固热应力低,裂纹缺陷不易出现。

以典型钢种 BU 为例,在拉速为 0.5 m/min、比水量为 0.18 L/kg 稳定工况下,铸坯温度及凝固进程分别如图 5 和图 6 所示。通过与实际生产过程中测温数据及射钉试验数据对比,计算偏差在 1.5% 以内,这充分验证了模型的可靠性。

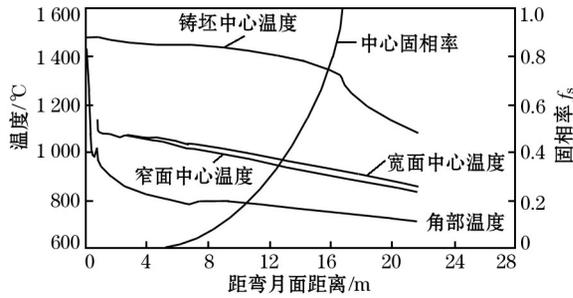


图 5 BU 拉速 0.5 m/min 温度曲线

Fig. 5 Temperature curve of BU in 0.5 m/min casting speed

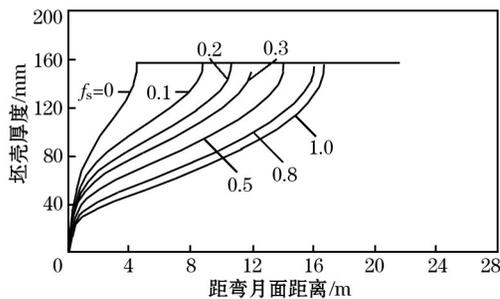


图 6 BU 拉速 0.5 m/min 凝固进程曲线

Fig. 6 Solidification curve of BU in 0.5 m/min casting speed

图 5 表示了稳态浇铸条件下铸坯表面温度、中心温度及角部温度沿浇铸方向的分布情况,同时表示了铸坯中心固相率 f_s 沿浇铸方向的变化曲线;图 6 表示铸坯整个过程中的凝固进程,包括两相区的位置、坯壳厚度、两相区中相同固相率的位置曲线。

根据模拟计算可为不同类别钢种设定合理的冷却制度,同时在稳定工况下,计算铸坯中心固相率及坯壳厚度等,也可为末端电磁搅拌的安装位置及合理轻压下区间设定提供依据。

对于特殊钢大方坯连铸,稳定优化的生产工艺及恒拉速控制是提升铸坯质量的关键。但是铸机不可避免地存在某些非稳态浇铸状态(包括换钢包操作、浇铸异常情况),由于拉坯速度的较大波动,水量也随之发生很大变化,这会造成铸坯表面温度的剧烈波动,容易在裂纹敏感的合金钢铸坯上

出现铸坯质量缺陷。为避免这种情况,在合金钢连铸机上,可以采用在线动态二冷控制技术。

采用二冷动态配水技术的特点为:(1)采用“坯龄”模型,记录、计算铸坯的热历程,实现稳态、非稳态工况下的稳定控制;(2)针对不同钢种的凝固特性,制定控制目标温度,根据铸坯表面温度,动态调整各区水量,实现实时控制。

动态二冷模型流程图及动态二冷程序界面分别如图 7 和图 8 所示。

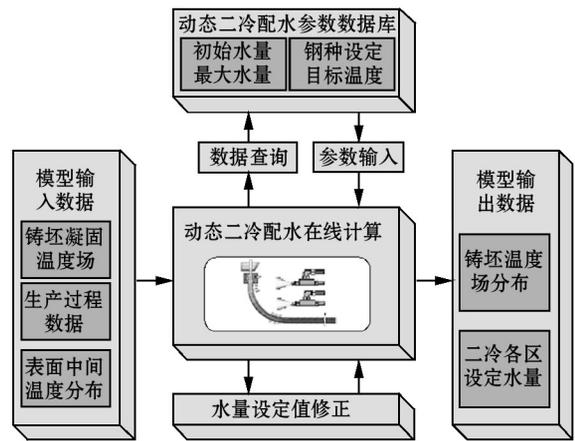


图 7 动态二冷模型流程图

Fig. 7 Flow diagram of dynamic secondary cooling model

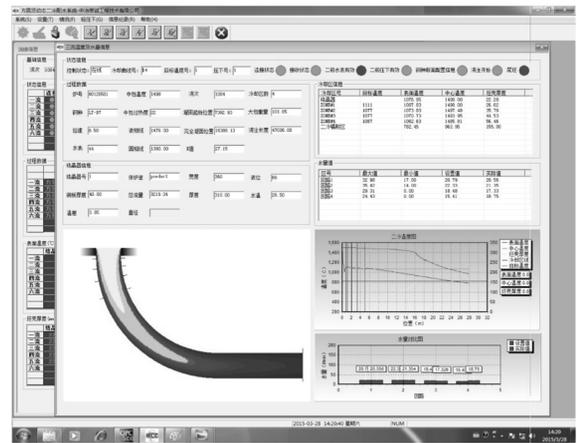


图 8 动态二冷程序界面

Fig. 8 HMI of dynamic secondary cooling model

1.2.5 组合式电磁搅拌(M+F-EMS)

为获得最佳的铸坯表面和内部质量,铸机配置外置式结晶器电磁搅拌和凝固末端电磁搅拌系统。其中末端电磁搅拌已经成为合金钢大方坯连铸过程中降低疏松、偏析和缩孔等级的标准配置。本连铸机末端电磁搅拌系统技术特点为:(1)连铸机设计中使用大功率电磁搅拌器,确保产生足够搅拌力和搅拌速度,要求中心磁感应强度幅值大于

80 mT, 从而确保达到最佳的搅拌效果; (2) 合理的末端电磁搅拌安装位置对于发挥其冶金效果至关重要, 因此, 连铸机固定导向段上设计 3 个末端搅拌安装位置, 连铸机可根据浇铸不同断面、钢种及拉速情况选择合理安装位置, 从而达到最佳的搅拌效果。

末端电磁搅拌位置安装超前, 铸坯中心仍存在较大比例的液相区, 此时的搅拌实际是二冷段搅拌 (S-EMS), 它的冶金效果特别是在降低 V 型偏析等级上与末端电磁搅拌相比有较大的差距^[7]; 末端电磁搅拌安装位置滞后, 钢水黏性较大, 很难起到改善铸坯内部质量的作用, 因此, 末端电磁搅拌位置从连铸机系统设计开始就必须考虑如何与连铸工艺参数特别是拉速相匹配。

中心固相率和面积凝固率是确定末端电磁搅拌安装位置的重要参数。其中中心固相率 f_s 在 0~0.2 范围内作为末端电磁搅拌的合理位置适用于所

有钢种^[8]; 面积凝固率 D_s 在 0.6~0.8 范围内作为末端电磁搅拌的合理位置只适用于高碳特殊钢^[9-11]。中心固相率和面积凝固率计算见式(2)和式(3)。

$$f_s = \frac{T_L - T}{T_L - T_s} \quad (2)$$

式中: f_s 为中心固相率; T_L 、 T_s 分别为液相线温度和固相线温度, K; T 为凝固中心温度, K。

$$D_s = \frac{A}{A_0} \quad (3)$$

式中: D_s 为面积凝固率; A_0 、 A 分别为铸坯横截面积和该横截面上已凝固的面积, m^2 。

连铸机以生产高碳锰铬类磨球钢为主, 因此, 在电磁搅拌安装位置选择上兼顾以上 2 个参数, 通过凝固模型计算典型工况下的铸坯中心固相率和面积凝固率, 确定不同钢种生产拉速下的合理电磁搅拌安装位置。以典型钢种 BU 为例, 不同拉速下电磁搅拌安装位置及设定参数见表 3。

表 3 不同拉速下末端电磁搅拌安装位置及设定参数

Table 3 Implemented position and technological parameters of F-EMS at different casting speeds

拉速/(m·min ⁻¹)	安装位置	距离弯月面/m	中心固相率	面积凝固率	频率/Hz	电流/A	交替时间/s
0.50	1号	9.18	0.12	0.71	6	650	8-3-8
0.53	2号	10.72	0.15	0.72	6	650	8-3-8

1.2.6 组合压下技术(SR+HR)

连铸轻/软压下 (soft reduction) 是指在铸坯凝固末端一个合适的两相区内对铸坯实施一定的机械压下量, 用以弥补末端两相区的凝固体积收缩, 破碎已经形成的“晶桥”^[12], 抑制中心浓化钢水积聚, 从而最大程度上减轻中心疏松和中心偏析的技术。

轻压下技术被认为是改善高碳钢大方坯中心偏析的最佳方法^[13]。对铸坯实行轻压下的适宜位置是从铸坯中心固相率约 0.3 到铸坯中心固相率达到流动极限固相率 f_{sc} 之间的一段区间^[14], 当 $f_s > f_{sc}$ 时, 钢液黏性很大, 基本不会流动, 此时压下很难改善铸坯中心偏析。对于大方坯连铸机压下区间, 一般控制中心固相率为 0.3~0.8, 过早实施轻压下或压下量太大将导致内部裂纹, 过晚实施轻压下或压下量不够将导致质量下降。保持稳定的拉速对成功实施大方坯轻压下非常关键。

连铸重/硬压下 (hard reduction) 是指在凝固终止后继续实施机械压下, 可以进一步减少中心疏松和缩孔, 提高铸坯组织中心致密度。这项技术也可以在低碳钢和中碳钢上应用。

大方坯连铸轻、重压下技术典型应用如日本爱

知制钢知多厂 3 号大方坯连铸机, 生产 370 mm × 480 mm 断面特殊钢, 采用凸辊拉矫机进行轻压下, 同时在每流拉矫机后配 1 个凸辊重压下机架, 实施大压下量的重压下。韩国浦项公司浦项厂 2 号大方坯连铸机, 主要生产 400 mm × 500 mm 断面帘线钢, 采用凸辊拉矫机进行轻压下^[15]。国内常规大方坯轻压下铸机一般多采用平辊进行压下, 近年来也有个别钢厂进行了凸辊压下的生产实践。凸辊压下在对更大断面方坯提高压下效率和设备轻量化方面更具优势, 但对小断面方坯凸辊轻压下, 也可能因为铸坯跑偏导致非对称凝固现象发生, 从而产生加剧偏析的反效果, 另外, 凸辊压下后的坯形在轧钢生产环节会增加新的特殊要求。

笔者认为, 轻、重压下技术的划分应从不同压下位置及冶金目的进行界定, 而不应该从压下辊形和压下量的大小进行区分, 压下辊形设计和压下量的选择应该综合考虑钢种、断面、铸机设计情况以及产品质量要求来最终确定。

本连铸机设计采用传统平辊牌坊式拉矫机对铸坯实施组合压下 (SR+HR)。压下技术系统组成包括: (1) 带位移传感器和比例伺服阀控制的牌坊

式拉矫机完成对铸坯的连续矫直及压下;(2)拉矫机专用液压系统及远程辊缝调节电控系统;(3)1级工艺模型(拉速-压下控制模型)及2级动态压下模型。

图9和图10所示分别为SR+HR压下位置原理图及拉矫机布置示意图。

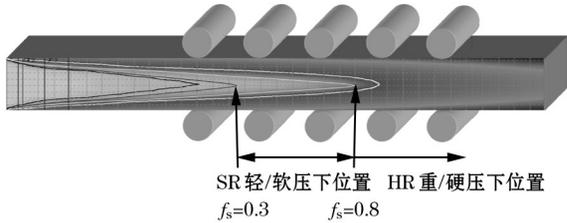


图9 SR+HR压下位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of SR+HR implemented position

压下技术的设计特点及关键环节为:(1)拉矫机采用有限元计算校核机架刚度,夹辊选择42CrMo锻件材质,优化的全水冷设计保证长期使用稳定可靠,油缸顶端安装位移传感器,辊缝控制精度在±0.15 mm以内;(2)液压系统压力达到21 MPa,拉矫机压下能力满足高碳锰铬类磨球钢压下要求;(3)制定合理的辊缝标定流程,选择适宜的标定压力是实施压下技术的前提;(4)制定合理的压下模型,根据钢种、断面、拉速确定合理的压下位置及压下参数;(5)对于合金钢大方坯连铸,稳定的生产拉速控制是实施压下技术确保铸坯质量的关键。

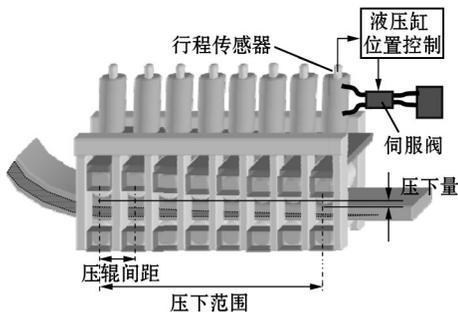


图10 拉矫机布置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of straightening machine system

稳定的拉速控制对于电磁搅拌及压下技术的使用效果极为重要,因此中冶京诚开发了1级拉速压下控制模式,便于操作人员在HMI上执行或修改压下参数,方便调试及优化生产工艺,可与2级动态压下模式切换使用。

2 铸机生产应用情况

连铸机自投产以来运行稳定可靠,工艺参数设

定、设备性能均能够满足不同钢种的生产要求,成功生产了B2、B3、B6、B7、BU等系列化高碳锰铬类磨球钢品种,铸坯表面及内部质量好,连铸机年产量约90万t,得到用户的高度评价。

采用组合电磁搅拌加组合压下技术(M+F-EMS+SR+HR)对提升铸坯内部质量效果明显,从铸坯低倍检验来看,铸坯中心疏松不低于行业1级标准(YB/T 4002—2013),无中心缩孔。图11所示为钢种B3在0.53 m/min拉速下采用M+F-EMS+SR+HR生产的铸坯横截面低倍组织。

图12和图13所示分别为钢种BU($w(C)=1\%$)在0.5 m/min拉速下采用M+F-EMS+SR+HR生产的铸坯横、纵截面试样低倍组织。从纵截面低倍



图11 钢种B3铸坯横截面低倍组织

Fig. 11 Macrostructure of B3 on cross section

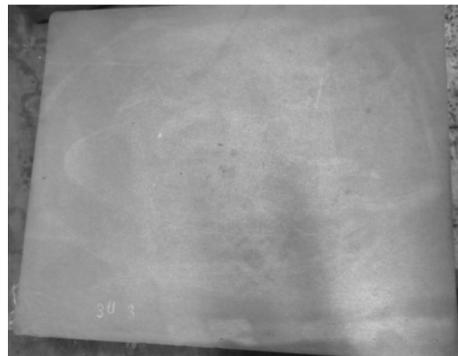


图12 钢种BU铸坯横截面低倍组织

Fig. 12 Macrostructure of BU on cross section

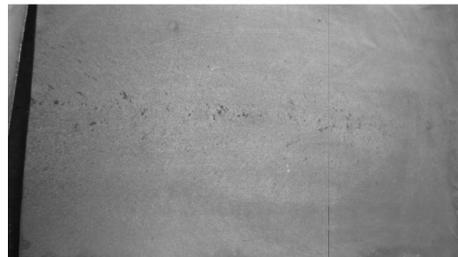


图13 钢种BU铸坯纵截面低倍组织

Fig. 13 Macrostructure of BU on vertical section

组织可以看出,采用轻压下技术中心偏析线明显变弱,并且极为分散,“V”型偏析线变得很模糊。在图 14 和图 15 中取样位置用 5 mm 钻头、钻孔深度 8 mm 钻取钢屑,进行化学成分分析。碳偏析指数计算见式(4),采用 M+F-EMS+SR+HR 工艺,试样沿厚度方向碳偏析指数范围为 0.93~1.08,沿纵剖中线方向碳偏析指数范围为 0.95~1.09,通过与仅采用 M+F-EMS 技术生产的铸坯偏析测试结果对比,最大值及极差值明显变小,成分更均匀,轻压下技术对铸坯中心偏析改善效果明显。钢种 BU 在 0.5 m/min 拉速下沿厚度方向及纵剖中心线方向碳偏析指数分布分别如图 16 和图 17 所示。

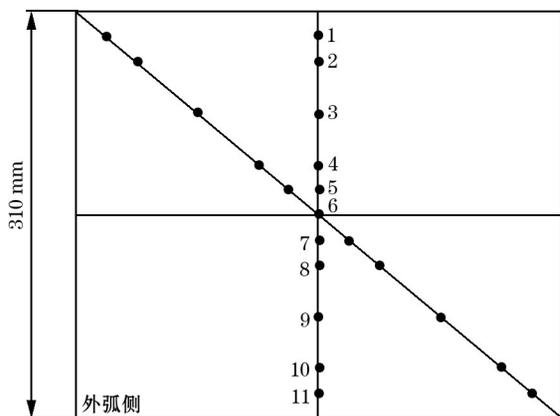


图 14 化学分析钻样示意图(横)

Fig. 14 Schematic diagram of chemical analysis (landscape)

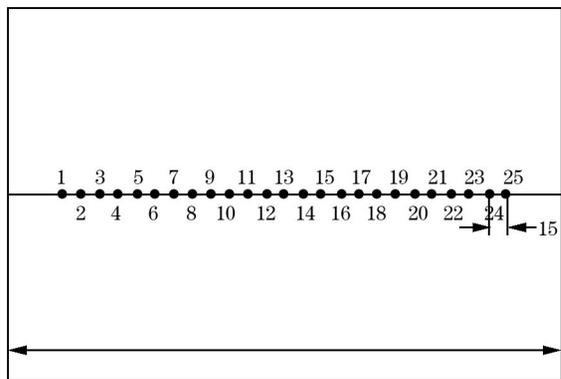


图 15 化学分析钻样示意图(纵)

Fig. 15 Schematic diagram of chemical analysis (longitude)

$$CSI = \frac{C_i}{C_0} \quad (4)$$

式中:CSI 为取样点碳偏析指数; C_i 为取样点碳质量分数,%; C_0 为中间包取样碳质量分数,%。

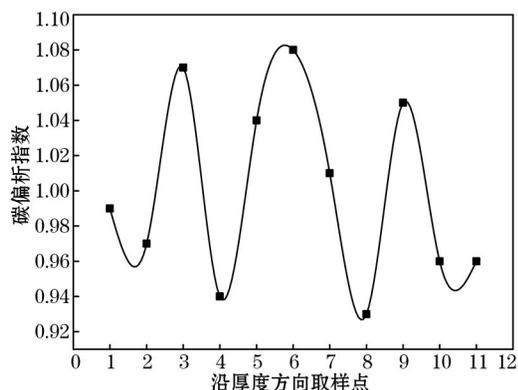


图 16 沿厚度方向碳偏析指数

Fig. 16 Carbon segregation index along thickness direction

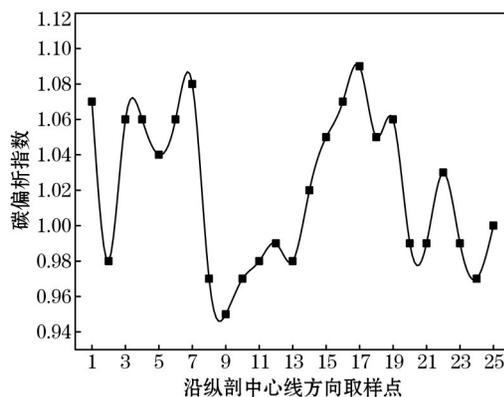


图 17 沿纵剖中心线方向碳偏析指数

Fig. 17 Carbon segregation index along longitudinal direction

3 结语

中冶京诚自主设计六机六流合金钢大方坯连铸机,配备了提升铸坯质量的先进技术及关键装备,投产以来运行稳定,成功生产了系列化高碳锰铬类磨球钢品种,占据全球大部分高端应用市场,为企业创造了良好的经济效益。

铸机生产实践表明,采用组合电磁搅拌(M+F-EMS)及轻、重压下(SR+HR)技术,选择合理的搅拌参数及压下参数,可以显著降低高碳钢中心偏析及“V”型偏析,改善中心疏松,消除中心缩孔。

参考文献:

[1] 徐佩芬,吴海平. 耐磨球段的市场需求及应用[J]. 铸造技术, 2012, 33(2): 200. (XU Pei-fen, WU Hai-ping. Market demand and application about mill ball and rod[J]. Foundry Technology, 2012, 33(2): 200.)
 [2] 胡亮,郭红民,段少平. 凝固末端电磁搅拌对 82B 碳偏析的影响[J]. 中国冶金, 2018, 28(9): 63. (HU Liang, GUO Hong-min, DUAN Shao-ping. Effect of F-EMS on carbon segregation of

