

本钢 2[#]连铸机设备升级改造中新技术的应用研究

Application of New Technology in Equipment Upgrading of 2[#] Slab Caster at Benxi Steel

供稿|刘伟芳, 范育新 / LIU Weifang, FAN Yuxin

内容导读

介绍了本钢炼钢厂 2[#]连铸机通过设备改造后所采用的一系列新技术。这些技术包括塞棒控流系统、结晶器液压振动功能、倒角结晶器技术、结晶器液压调宽技术和扇形段辊列优化技术等。塞棒控流技术可以改善结晶器流场, 提高钢水纯净度; 结晶器液压振动功能以及倒角结晶器技术提升了板坯表面实物质量; 扇形段辊列优化技术有效地解决了包晶钢结晶器液面波动问题, 同时, 也提高了板坯的表面和内部质量。此外, 通过结晶器液压调宽新技术的应用, 本钢 2[#]连铸机生产的品种结构得到了很好的拓展, 可以稳定生产出对品质要求更高的品种钢, 尤其是对表面质量和内部质量要求极为严格的汽车钢, 使其更加适应市场的需求。

鞍钢集团本钢股份有限公司炼钢厂 2[#]板坯连铸机, 投产于 2000 年, 是由奥钢联 (VAI) 设计的直弧型、连续弯曲、连续矫直、小辊径密排辊的连铸机, 设计能力为 175 万 t/a。主要生产钢种包括汽车板、管线钢、高强结构钢、耐候钢等。自投产以来, 在生产包晶钢时, 结晶器液面频繁出现波动问题, 极大地限制了拉速的提高, 且因结晶器振动采用早期机械振动式构造, 振痕较深, 极易引起铸坯坯壳的卷渣, 从而导致铸坯在后序冷、热轧工序生产时出现轧材夹杂缺陷, 影响了轧材的表面质量^[1]。

为了进一步提高板坯质量, 满足高效连铸的生产条件, 力争生产无缺陷铸坯, 2015 年 8 月、2018 年

8 月, 分别对 2[#]连铸机的铸流控流系统、连铸机本体进行了设备及技术升级改造, 改造的主要目标如下:

- (1) 解决包晶钢结晶器液面波动问题;
- (2) 提高汽车钢、高强钢等钢卷的产品质量;
- (3) 降低铸坯角部缺陷率, 提高铸坯热过率。

为了完成上述目标, 本次升级改造项目, 采用的主要技术有: 滑板改塞棒控流系统、倒角结晶器技术、结晶器在线液压调宽、结晶器液压振动、扇形段辊列优化设计、二冷水分区动态配水模型优化等。在改造过程中, 由中冶京诚工程技术有限公司提供并安排塞棒控流系统, 以及扇形段辊列设计方案; 西峡龙成特种材料有限公司提供倒角结晶器

相关技术服务。2015 年 8 月对塞棒控流系统进行改造，2018 年 8 月对结晶器振动、辊列设计等本体设备进行升级改造。并于 2018-08-24 一次热负荷生产成功，同年 9 月完成项目功能考核。

技术改造概况

连铸机技术参数

升级改造的主要工艺参数变化如表 1 所示。

表 1 改造前后相关技术参数对比

项目	台数×流数	连铸机型	基本半径/m	结晶器振动	控流系统	结晶器形状	在线调宽
改造前	1×2	直弧型	10	机械	滑板	直角	机械式：窄幅/低精度
改造后	1×2	直弧型	10	液压	塞棒	倒角	液压式：宽幅/高精度
项目	厚度/mm	宽度/mm	冶金长度/m	矫直点	二冷配水	辊径	
改造前	210、230、250	800~1600	29.2	多点矫直	多幅分区	足辊数3，φ100 mm； 0段辊数15，φ150 mm； 扇形段每段辊数7，φ300 mm	
改造后	210、230、250	800~1600	31.5	多点矫直	多幅分区	足辊数1，φ100 mm； 0段辊数17，φ160 mm； 扇形段每段辊数7，φ300 mm	

新技术的主要特点

➤ 结晶器液压振动

连铸机结晶器振动的主要功能是防止铸坯出结晶器时与结晶器器壁发生粘连。传统机械振动技术，只能采用固定振幅、固定波形的振动参数，而结晶器液压振动可以在线调整振幅、振频，根据工艺条件的要求任意改变振动波形，实现正弦或非正弦振动。

钢铁企业的产量规模，很大程度上取决于连铸机稳定的拉速。连铸机未改造前，结晶器采用机械振动技术，在高拉速运行或是高拉速向低拉速转换时，很容易出现振动失真，这对铸坯在结晶器内初生坯壳的形成是很不利的，极易造成铸坯夹渣甚至

断渣，严重时造成漏钢。此外，偏振是机械振动结晶器很易发生且又非常危险的机械故障，一旦发生偏振，如果不及时发现，就会发生漏钢事故，对生产造成很大影响^[2]。

改造后的液压振动，采用的是高可靠性和抗干扰能力的 PLC 控制，可以保证长期稳定的振动波形，不会发生因机械磨损等因素造成的偏振问题。而且液压振动具有可改变振动曲线的新技术，可以根据钢种特性，改变振动波形，因此可以实时改变铸坯表面与结晶器铜壁的接触状态，从而提高铸坯表面质量，并且减少粘结漏钢的概率，增加浇铸安全性。表 2 为液压振动主要技术参数。

表 2 液压振动主要技术参数

液压缸数量 ^①	振幅范围 ^② /mm	振动频率 ^③ /Hz	精度/mm		
			X向	Y向	Z向
2	-7~7 mm	0.5~5.8	±0.10	±0.10	±0.18

注：①每个单元1个，带传感器；②可自动调节；③非正弦系数：0.1~0.4（0为正弦）

➤ 塞棒控流系统

连铸机在实现连续浇注的功能时，需要保证中间包的钢水能够稳定地流入结晶器内，而中间包控流系统是实现这一功能的最重要的一环。目前国内连铸机中间包控流系统主要有塞棒控流和滑板控流 2 种方式。

研究表明，相较于滑板控流系统，采用塞棒单独控流方式，可以消除因滑板单向控流造成的水口

结瘤问题，提高连浇炉数。而取消滑板控流系统，也减少了一套控制机构，降低了因机械、电器、液压等影响造成机构失灵的概率，从而降低事故发生率^[3]。同时，采取塞棒单独控流，可以减少因滑板控流造成的偏流，利于钢水夹杂物的上浮。塞棒控流系统的主要技术参数如下。

数量：每个中间罐 2 套系统；

形式：液压缸驱动，结晶器液面自动控制；

提升行程: -30~70 mm;

液面精度: ± 2 mm;

自动开浇成功率: $\geq 98\%$ 。

➤ 倒角结晶器技术

结晶器是承接从中间包注入的钢水, 并使之凝固成铸坯的设备。它是连铸机最关键的部件, 其结构、材质和性能参数对铸坯质量和铸机生产能力起着决定性作用。倒角结晶器与直角结晶器传热示意如图1所示。传统的直角结晶器的角部, 属于二维传热, 受结晶器宽、窄侧水量影响较大, 角部横裂纹产生几率高, 铸坯在轧钢过程中, 极易出现边部折叠缺陷引起轧材角部缺陷。此外, 直角结构的结晶器, 其窄侧导向装置结构不能灵活调整, 结构局限大, 不能对铸坯起到良好的支撑。而倒角结晶器通过改变窄边铜板的结构, 在窄边铜板两侧各增加一个 150° 钝角倒角, 使原边部直角位置的冷却多了一个冷却面, 从而延缓铸坯角部冷却, 分散低温区, 提高铸坯角部温度, 避开 $700\sim 900^\circ\text{C}$ 矫直脆性温度区间^[4]。窄面铜板结构变化后在角部增加了冷却通孔, 在铸坯同一横截面上可以有效提高铸坯温度的均匀性。可使铸坯的生长更加均匀, 减少铸坯出现角部缺陷的可能。因内腔结构的变化, 出坯后铸坯角部棱角形状改变, 铸坯角部由原来的直角结构变为斜面结构, 这一结构的变化可降低铸坯角部应力集中情况, 有效改善或消除铸坯角部横裂^[5], 轧钢过程中边部折叠的问题也迎刃而解。

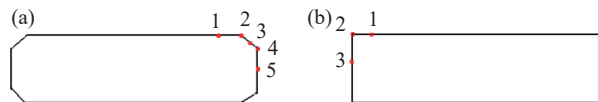


图1 倒角结晶器(a)与直角结晶器(b)传热示意图(数字为传热点示意)

➤ 液压在线调宽

高效连铸最为关注的是如何在高速、稳定的环境下, 生产出优质钢坯。为了适应不同品种、不同规格的需求, 缩短停机周期, 高效运行, 成为各大工厂追求的技术目标, 而在此需求下, 结晶器在线调宽技术逐渐发展, 目前已在国内外大型钢企中普通应用。

本钢2[#]连铸机最初设计时, 采取的是传统机械调宽, 运行精度低, 设备维护复杂。而改造成液压调宽由于只有液压缸、铜板两个装置, 中间无间隙连接, 维护简单, 且运行精度大幅提高。

➤ 辊列优化设计

连铸在生产包晶钢时, 结晶器液面极易出现周期性的波动。产生波动的主要原因为: 钢液在扇形段内产生包晶相变反应 $L+\delta\rightarrow\gamma$, 使液芯发生约4%的体积收缩, 扇形段内铸坯的液芯容积发生变化, 造成结晶器液面出现波动^[6]。包晶钢在铸坯鼓肚时产生泵吸效应, 导致结晶器液面迅速下降, 结晶器液面控制系统会向结晶器充填钢水。同时随拉坯进行, 鼓肚区域到两个辊子中间被压缩, 液相穴内钢水也向结晶器内填充钢水, 使液面迅速上涨, 使结晶器内坯壳生长更不均匀。

改造前2[#]连铸机足辊辊列与辊径只有一种, 随着铸坯浇注的进行, 形成连续的变形。上述收缩、挤压的过程每形成一次, 就会挤压铸坯液芯向上运动一次, 波动情况就会越来越剧烈。如此反复, 形成共振效应, 使结晶器液面波动加剧^[7]。针对辊列单一的问题, 升级改造中将结晶器足辊、0段辊径、扇形段辊径分别进行了优化设计, 具体技术参数变化如图2所示。

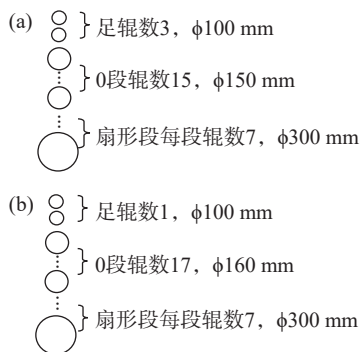


图2 辊列优化设计示意图:(a)改造前;(b)改造后

技术升级后的应用效果

结晶器液压振动

结晶器采取液压振动后, 铸坯表面质量获得了很大的提高。图3为连铸机改造前后同一钢种规格, 相同生产参数的铸坯情况, 从图可知采用液压振动生产的铸坯, 表面振痕平滑、清晰; 而采用机械振动生产的铸坯振痕紊乱, 而且凸凹不平, 其铸坯皮下极易裹入保护渣, 在热轧轧制时易产生夹杂缺陷。

此外, 统计采用液压振动和机械振动生产的铸

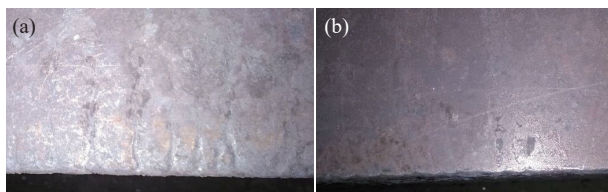


图3 采用不同振动方式生产的铸坯: (a) 机械振动; (b) 液压振动

坯, 其在热轧后的轧材的夹杂缺陷率前者为 0.16%, 而后者为 0.28%。可见采用液压振动后, 能够显著降低铸坯在热轧的夹杂缺陷率。

塞棒控流系统

塞棒控流系统代替原有的滑板控流系统, 结晶器液面更加平稳。同时由于水口氩气系统也一并升级更新, 让结晶器内钢水中的夹杂物上浮更加充分。

图4为改造前采用滑板控流系统, 改造后采用塞棒控流系统生产的 DQ1J 超低碳钢轧材试样电镜分析。

表3为图4(a)的能谱结果, 采用滑板控流系统生产的 DQ1J 超低碳钢轧材表面存在片状不规则沟状及起皮状, 沟状底部局部存在 Na、Ca、F 等化学成分, 说明轧材缺陷点的表面及皮下, 均有保护渣卷入的痕迹^[8]。表4为图4(b)的能谱结果, 采用塞棒控流系统生产的 DQ1J 超低碳钢轧材表面缺陷点成分主要为 Al、O 化合物, 分析存在小簇状 Al_2O_3 夹杂物, 未发现之前的保护渣产物。说明采取塞棒控流后, 中间包流场有了明显的优化效果, 夹杂物被中包覆盖剂捕获、吸附的几率增大, 进而提高了钢水的纯净度。

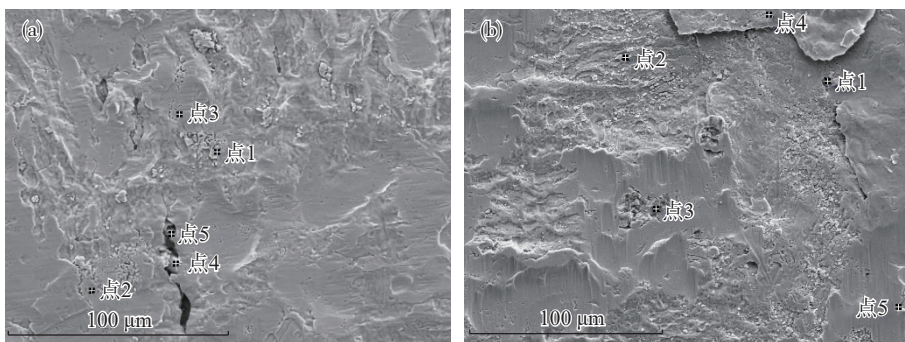


图4 DQ1J 轧材夹杂缺陷电镜分析: (a) 滑板控流; (b) 塞棒控流

表3 DQ1J (滑板控流) 生产后轧材夹杂缺陷点成分 (质量分数)

位置	O	F	Na	Mg	Al	Si	P	Ca	Mn	Fe
点1	15.05		2.32	0.54	1.57	4.12		3.44	0.60	72.34
点2						0.45			1.32	98.22
点3	14.03		1.83	1.35	1.73	3.68		1.61	1.79	73.99
点4	18.54		1.07	0.70	0.66	5.19		6.96	0.39	66.48
点5	29.64	13.65	1.42	1.49	1.15	9.40	0.27	15.84	0.62	26.51
点6										100.00

表4 DQ1J (塞棒控流) 生产后轧材夹杂缺陷点成分 (质量分数) %

位置	O	Al	Fe
点1	51.97	32.28	15.75
点2			100.00
点3	2.10	1.05	96.85
点4			100.00
点5			100.00

倒角结晶器技术

相关研究表明, 在连铸采取倒角结晶器技术后, 在合适的拉速范围下, 铸坯表面质量将会有显著的提升^[9]。表5中统计了改造前后, 低碳钢、中碳钢、低合金高强钢、包晶钢 4 个钢类铸坯热送率情况, 可知: 改造后整体热送率提升明显, 其中中碳钢热送率最为显著, 由之前的 50% 提升至 91%; 同时, 采用倒角结晶器之后, 铸坯在热轧轧制后, 出

现边部翘皮的缺陷概率也大大降低,说明此项技术对改善铸坯角部质量,起到了积极作用。

表5 改造前后热送率情况

钢类	钢种代表	改造前热送率/%	改造后热送率/%
低碳钢	SAE1006	90.0	97.5
中碳钢	A36	50.0	91.0
低合金高强度钢	BG380CL	65.0	91.0
包晶钢	SPHT2	60.0	77.6

液压在线调宽

通过技术改造,使得连铸机原有的机械调宽升级为液压调宽,调宽精度及连续调宽次数均有了明显的提高。配合倒角结晶器技术,对结晶器第一排足辊进行改进。且保证足辊斜面与结晶器铜板的接弧保持相对严格的精度(偏差小于1.5 mm)^[10],保证稳定的调宽运行精度。稳定的在线调宽技术,有利于优化连浇炉次的品种结构,减少更换中间包的频次,从而减少非稳态铸坯的数量,提高铸坯表面质量。在线调宽效果见表6。

表6 改造前后调宽效果对比

项目	最大调宽次数	间隙精度/mm	每月花费中间包数量
改造前	3	±0.3	308
改造后	8	±0.125	210

辊列优化设计

通过辊列优化设计后,跟踪生产BG380CL、BG420CL及同类的包晶钢,共计300炉次,波动发生的频率由改造前的88%降低至改造后的5%,波动幅度也由改造前的±25 mm降低至改造后的±10 mm,基本解决了包晶钢结晶器液面波动的问题,同时包晶钢热轧夹杂缺陷率也有改造前的3.8%降低至改造后的1.3%。

结论

(1)改造后的2[#]连铸机,采用了液压振动、倒角

结晶器、塞棒控流等许多先进的工艺技术,对改善结晶器液面平稳度、提高铸坯热过率、降低轧材缺陷率起到了积极的作用。

(2)通过与中冶京诚工程技术有限公司、西峡龙成特种材料有限公司的合作,本钢炼钢厂自主完成了工艺技术的集成优化,特别是结晶器液面控制系统、辊列优化技术创新等技术的自主研发,实现了技术引进与创新的结合。

参考文献

- [1] 王亿东.结晶器的机械振动与液压振动技术分析//2006中国金属学会青年学术年会.无锡,2006
- [2] 谢长川,钱亮,韩占光,等.连铸机振动参数的优化方法探讨.特殊钢,2021,42(1):35
- [3] 闵浩然,宋泽敏,刘光明,等.现代连铸技术在武钢三炼钢2号连铸机的应用//第十一届中国钢铁年会论文集:S02炼钢与连铸.北京:冶金工业出版社,2017
- [4] 王文军,李本海,朱志远,等.板坯连铸倒角结晶器的开发与应用.钢铁研究学报,2012,24(9):21
- [5] 陈秋宇,刘崇林,周汉全.倒角结晶器开发应用及其工艺优化.广西节能,2021(2):37
- [6] 荆德君,刘中柱,蔡开科.包晶相变对连铸坯初生坯壳凝固收缩的影响.钢铁研究学报,1999(3):13
- [7] 苏志坚,江中杰,陈进,等.板坯连铸过程结晶器内钢液面异常波动的机理//第十二届中国钢铁年会论文集:2炼钢与连铸.北京:冶金工业出版社,2019
- [8] 王佳明,贾国军,王晓飞,等.超低碳无间隙原子钢表面卷渣夹杂控制实践.山东冶金,2021,43(6):3
- [9] 刘斌,王明林,张慧,等.拉速对板坯倒角结晶器钢液流动的影响.连铸,2021(6):29
- [10] 汪洪峰,李毅挺.一种连铸倒角结晶器在线热调宽的方法:中国专利.201911283077.3.2021-07-23

作者简介:刘伟芳(1980—),男,辽宁省盘锦市人,本钢炼钢厂质量工程师。2004年毕业于东北大学冶金工程专业,主要研究方向:连铸坯质量管理,热轧材产品质量提升相关研究。通信地址:本溪本钢板材股份有限公司炼钢厂;E-mail:31831592@qq.com。