• 今日铸造 Today Foundry •

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2335

高拉速板坯连铸技术研究现状

陈 阳[1],王 芳[2],魏 民[1],张炯明[3],李富帅[1],陈志凌[1],李秀杰[1],王学思[1]

(1. 中冶南方连铸技术工程有限责任公司,湖北 武汉 430073; 2. 武汉工程科技学院 人文学院,湖北 武汉 430200; 3. 北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083)

摘 要:常规板坯铸机浇注窄断面铸坯或生产品种钢时,浇注周期被迫延长,难以实现炉机匹配,严重制约了炼钢车间的生产能力,因此提高连铸机的生产率迫在眉睫,高拉速已成为现代连铸发展的重要方向。本文回顾了国内外高拉速板坯连铸技术发展历程,总结了高拉速连铸的技术特点,重点介绍了高效强冷结晶器、非正弦振动、钢液流动控制、高拉速结晶器保护渣、FC (flow control)结晶器、二冷精准控制等多项关键技术,用于解决高拉速板坯稳定生产的技术难题。高拉速的实现是一项集工艺、装备、生产操作与自动化控制于一体的综合性技术。

关键词:高拉速;板坯连铸;FC 结晶器;液面波动;二冷精准控制

中图分类号:TF777.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)03-0274-12

Research Status of High Speed Slab Continuous Casting Technology

CHEN Yang[1], WANG Fang[2], WEI Min[1], ZHANG Jiongming[3], LI Fushuai[1], CHEN Zhiling[1], LI Xiujie[1], WANG Xuesi[1]

(1. CCTEC Engineering Co., Ltd., Wuhan 430073, China; 2. Faculty of Humanities, Wuhan University of Engineering Science, Wuhan 430200, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: When casting narrow sections or producing high quality steel grades by conventional slab caster, the pouring cycle is forced to be prolonged, and it is difficult to achieve matching of the furnace and caster, which seriously restricts the production capacity of steelmaking workshops. Therefore, it is urgent to improve the productivity of caster, and high casting speed has become an important development direction of modern continuous casting. This paper reviews the development history of high speed slab continuous casting technology at home and abroad, summarizes the technical characteristics of high speed continuous casting, and focuses on the high efficiency strong cooling mold, nonsinusoidal oscillation, molten steel flow control, mold powder, FC (flow control) mold, secondary cooling precision control and other key technologies, which are used to solve the technical problem of stable production of slabs with high casting speed. The realization of high casting speed is a comprehensive technology integrating technology, equipment, production operation and automatic control.

Key words: high casting speed; slab continuous casting; FC mold; liquid level fluctuation; precise control of secondary cooling

钢铁行业发展迅速、竞争激烈,生产效率和产品质量成为钢企永恒的追求目标。连铸在整个钢铁冶金流程中起到承上启下的作用,直接影响到钢铁企业的竞争力。超低排放被认为是钢铁行业通往绿色发展的新开端,随着国家经济政策的改革,为降低成本、提高产量,冶炼炉逐步向大型化、高效化方向发展,这就会导致连铸工序匹配能力不足:常规板坯(宽度≤1 650 mm、厚度≤230 m)通常采用主流的直弧形铸机来生产, 受制于扇形段传动装置的布置及检修空间的限制,流数一般不超过两流[1],浇注窄断面铸坯或生产品种钢时,难以实现炉机匹配,连铸机的生产率迫切需要提高。开发高效连铸,实现更高的

收稿日期:2022-11-23

基金项目:国家自然科学基金(51834002)

作者简介:陈 阳,1982 年生,博士,正高级工程师. 主要从事连铸过程中数值模拟和铸坯质量控制研究. 电话:02781628120, E-mail:yangchen829@163.com

引用格式:陈阳,王芳,魏民,等. 高拉速板坯连铸技术研究现状[J]. 铸造技术,2023,44(3): 274-285.

CHEN Y, WANG F, WEI M, et al. Research status of high speed slab continuous casting technology[J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 274-285.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

拉速、作业天数、连浇炉数、质量水平和出坯温度成为实现其潜力的技术要点，受到各钢铁企业的青睐，其内涵是更高的生产率和更高的质量，核心是更快的拉速，目标是降低成本、减少能源消耗和排放[2]。

当前装备条件下，高效连铸提供了一条高效、经济的发展路径。各钢铁企业都具有不断提高拉速的巨大挖掘潜力和研究动力，因为这不仅可以减少基础设施投资，提高铸机小时产量，还可降低生产成本与减排 CO_2。然而，由于浇铸时间缩短，炼钢节奏加快，在实际生产中拉速的提高势必带来新的问题：结晶器液面会因为拉速的增加而剧烈波动；保护渣消耗量也会相应减少，这会降低渣膜的稳定性和均匀性，造成铜板和坯壳间传热不均，从而增大其摩擦阻力；结晶器内初生坯壳易黏结和内裂，增大漏钢几率，同时铸坯质量恶化[3]。为此，需要开发高效强冷结晶器、高拉速结晶器保护渣、3D 漏钢预报系统、电磁制动技术和非正弦振动技术等控制手段，达到改善结晶器传热与润滑的目的，防止漏钢事故发生；需要通过控制结晶器内钢液流动状态来抑制液面波动，防止卷渣；还需要实现二冷精准控制，不断优化工艺参数来解决高拉速板坯连铸稳定生产的技术难题。

1　高拉速板坯连铸技术发展

国外研究常规板坯高拉速连铸技术起步较早，最先于 20 世纪 70 年代在日本发展起来，其先进生产水平如表 1 所示，中碳钢的拉速基本都能达到 2.0 m/min 以上，低碳钢的拉速甚至可以达到 2.5~3.0 m/min[4]。

2005 年后国内建设了数台高拉速板坯连铸机，如宝钢 4# 铸机、首钢京唐 1# 和 3# 铸机、邯宝钢厂 1# 铸机、马钢四钢轧厂 1# 铸机等。但是当今国内板坯铸机的工作拉速一般不超过 1.8 m/min，单流年产量 ~100 万吨，仅首钢京唐 3# 板坯铸机拉速可达到 2.5 m/min[5-8]，主要厂家与先进技术如下：

首钢京唐通过对结晶器冷却水、FC 结晶器、非正弦振动参数、二冷配水、浸入式水口结构（凹底与 -20° 倾角）、保护渣成分等参数进行优化，开发出浸入式水口防堵塞技术，不断提高铸机对弧精度，结晶器液面波动±3 mm，比例提高至 98%以上，铸坯窄面鼓肚量降至 5 mm 以内，3 号铸机 237 mm×1 050 mm 断面生产低碳铝镇静钢拉速达到 2.3 m/min，铸坯中心偏析≤C 类 1.0 级以下；铸坯氧化物夹杂≤0.5 级，铸坯内外部质量良好；同时转炉出钢温度可降低 ~15 ℃，钢包周转加快，体现了新一代钢铁工艺流程的优势。山西建龙 3# 单流板坯铸机210 mm×1 280 mm 断面生产 Q195 时最高试验拉速达到 2.2 m/min[9]。马钢将结晶器冷却水流速由 7.27 m/s 提高至 8.45 m/s，负滑脱时间、保护渣碱度与 1 300 ℃的黏度分别由 0.12 s、1.28 与 0.13 Pa·s变化为 0.15 s、1.29 与 0.12 Pa·s，亚包晶钢实现了 1.6 m/min 拉速的稳定生产，转炉冶炼周期与铸机生产周期相匹配，而且表面纵裂纹发生率控制在 0.3%以内[10]。此外，马钢为了使 230 mm×1 200 mm 低碳钢坯壳厚度更加均匀，同时减少结晶器卷渣、保证铸坯质量，应用了高效强冷结晶器与低粘度保护渣，最终保证拉速提高到 1.8 m/min，每炉浇钢时间减少 2.5 min[11]。

可见，当前国内常规板坯连铸的拉速水平与国外生产实践 2.5 m/min 相比还存在较大的差距。因此，提高拉速，缩短浇注周期，实现小规格铸坯和品

表 1 国外先进板坯高拉速生产现状

Tab.1 Current situation of foreign advanced high speed slab production

厂家	铸坯断面 /mm	生产钢种	拉速 /(m·min^{-1})	备注
新日铁大分厂 4# 板坯连铸机	1 900×280	超低碳钢	1.5	
		中碳钢	1.5	
名古屋厂 2# 板坯连铸机	1 300×245	低碳钢	2.0	最高 2.5 m/min
		超低碳钢	2.0	
JFE 福山 5# 连铸机	(700～1 650)×220、(675～2 100)×(220～300)	低碳钢	2.5	最高 3.0 m/min 通钢量 10 t/min “冠军铸机”
		超低碳钢		
		中碳钢	2.0	
神户制铁、住友金属与川崎制铁	(700～1 900)×(220～280)	低碳钢	2.0~2.5	
		超低碳钢		
		中碳钢	2.0	
浦项光阳厂 2# 和 3# 连铸机	1 600×250	低碳铝镇静钢	2.7	2007 年改造成功
		超低碳铝镇静钢	2.5	
		中碳钢	1.8	
		薄板坯	7.6	

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

种钢生产时的炉机匹配，有助于达到“转炉–精炼–连铸–轧钢”全流程生产线的高效化。

2 高拉速板坯连铸的技术特点

高拉速使得连铸与热轧工序更加紧凑，不仅提高了生产率，还缩短了生产工艺流程，能够大大减少投资、增加产量并降低原材料消耗。但随着拉速提高势必打破原有平衡，结晶器内凝固钢液发生较大变化，更易发生卷渣、铸坯质量缺陷甚至是漏钢事故，高拉速连铸的特征与危害如表 2 所示。

表 2 高拉速连铸的技术特点

Tab.2 Technical characteristics of high speed continuous casting

易表现出的特征	原因	危害
坯壳变薄	钢液在结晶器内停留时间短	鼓肚、漏钢
液面波动	水口供应钢液的流量大	卷渣，表面质量缺陷
润滑条件严重恶化	渣耗量降低，流入气隙的液渣少	摩擦阻力增大
传热状况不良	渣耗量降低，渣膜不均匀	初生坯壳不均匀，黏结性漏钢
裂纹焊合不利	坯壳在结晶器内停留时间短	表面裂纹

(1)高热流结晶器　为了提高拉速，需要相应增加结晶器的热通量，这就意味着初生坯壳要在相对更少的时间内形成，传统结晶器难以保证其具有足够的厚度与稳定性，难以抵抗较大的钢水静压力；同时其与结晶器之间的摩擦力也更大，更易造成鼓肚缺陷甚至漏钢事故。

(2)钢液流动控制　拉速提高，单位时间内通钢量增加，更快的钢液流股会导致结晶器液面波动加剧，进而增加坯壳卷渣概率、造成较严重的板坯轧制线状缺陷；同时钢液流股对窄面凝固坯壳的冲击速度加大，容易造成纵向裂纹。

(3)凝固传热行为　更快的拉速会使得保护渣消耗量更低，而铸坯与结晶器之间的摩擦力与渣膜厚度成正比，因而润滑性能下降，这又导致了结晶器内传热不均匀、初生坯壳生长不均匀，在坯壳薄弱处容易发生应力集中甚至是黏结性漏钢。

(4)铸坯内部质量　更高的拉速会增加液芯长度，会增加鼓肚的风险，同时也不利于补缩，会导致更加严重的中心缩松与偏析缺陷，导致内部裂纹发生率提高。

(5)铸坯洁净度　更快的拉速会增加钢液冲击深度，减少钢液停留时间，导致结晶器内大颗粒夹杂物来不及上浮排出，夹杂物数量相对增加，恶化铸坯表面质量，加大轧板缺陷风险。

(6)高效生产工艺流程　更快的拉速缩短了浇注周期，使得炼钢、精炼、连铸匹配难度增加，对生产调度提出更高要求。

(7)成本控制　高速拉虽然可以节约能源成本等，但如果技术发展不当，会带来额外的成本。原料要求过高、成分控制过窄、结晶器高压冷却与铜板磨损等都有潜在的成本控制空间，因此在发展高质量、新技术的同时还需要考虑整体效益的把控。

综上所述，从常规拉速到高拉速连铸常常遇到两大难题——黏结性漏钢和铸坯质量恶化。

连铸最大拉速与结晶器出口坯壳厚度、铸坯液芯长度和弯矫变形率有关[12]。对于新建板坯铸机而言，通过配置数量足够多的扇形段来不断延长冶金长度确保铸坯始终处于全凝固夹持状态，同时选取适宜的弯曲/矫直参数即可将弯矫变形率限制在合理区间内。

由式(1)可知，要突破拉速的限制，一是 δ_m 能否得到进一步降低，其大小主要是由钢种本身在高温下的抗拉强度决定的；二是增大 K_m，这就需要提高结晶器铜板与坯壳之间的换热效率，通过优化结晶器内腔结构与保护渣性能，最终解决坯壳不均匀生长的问题。

$$V_{max}=\frac{K_m^2 L_m}{\delta_m^2} \tag{1}$$

式中，V_{max} 为连铸机最大拉速，m/min；K_m 为结晶器凝固系数，mm/min$^{0.5}$；L_m 为结晶器有效长度，mm；δ_m 为结晶器出口坯壳安全厚度，mm。

2.1 结晶器出口安全坯壳厚度

根据生产经验，认为较小断面的方圆坯与较大断面的板坯或矩形坯的结晶器出口坯壳安全厚度 δ_m 分别为 8 mm 与 15 mm[12]，而 Ito 等[13]利用 JFE 仓敷 No.4 铸机热电偶实测温度实时计算出高拉速板坯结晶器内坯壳厚度为 10～18 mm。因此，针对不同断面、不同钢种准确定量 δ_m 具有非常大的实用价值。Qian 等[14]通过结晶器内初生坯壳的受力分析研究了黏结型漏钢的修复机理(图 1)，并得到了初生坯壳安全厚度的计算方法，见式(2)：

$$\delta_m=\psi\sqrt{\frac{6n\rho_{sh}g}{\sigma_s}\left[\frac{1}{6}\left(l_B^2-2l_A^2+l_A l_B\right)x_2-\frac{1}{2}l_A x_2^2-\frac{1}{6}x_2^3\right]} \tag{2}$$

式中，ψ 为浇铸钢种过热度、拉坯力的影响系数，取值范围为 1~1.3；n 为安全系数，取 2.5；σ_s 为坯壳的屈服强度，Pa；ρ_{sh} 为坯壳密度，取 7 850 kg/m^3。

其中，x_2 的表达式为：

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

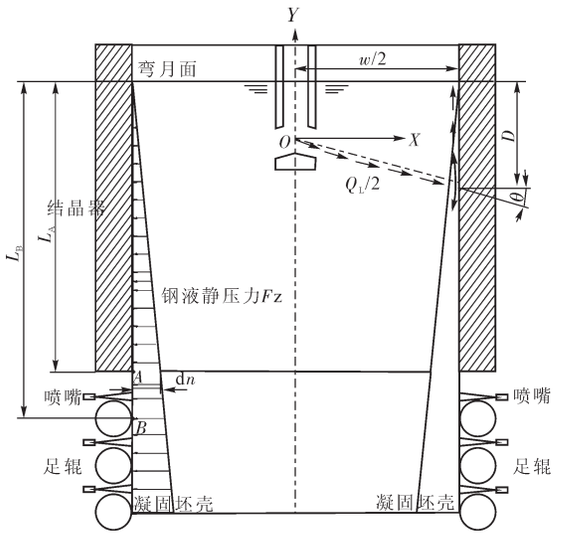


图 1　出结晶器的坯壳受力分析示意图[14]

Fig.1　Diagram of the force analysis of the mold shell[14]

$$x_2=\sqrt{\frac{l_A^2+l_B^2+l_Al_B}{3}} \tag{3}$$

式中，x_2 为结晶器出口至足辊间达到最大弯曲力矩的位置，m；l_A 为结晶器钢液面至其出口的距离，m；l_B 为结晶器钢液面至第一对足辊的距离，m。

由式(2)可知，倘若能提高坯壳的抗拉强度 σ_s，那么 δ_m 就可以得到相应的降低。钢的抗拉强度与温度呈负相关，因此可以通过降低温度来提高坯壳的抗拉强度，这就需要加强结晶器的冷却效率，尤其需要加强角部冷却以得到均匀的坯壳，此外还可以在二次冷却区进行强冷。以 SS400 钢种为例，坯壳的屈服强度 σ_s 可通过材料高温力学性能试验获得，如表 3 所示；当 l_A=800 mm、l_B=910 mm 时按式(2)计算得出坯壳安全厚度 δ_m，详见表 3，一般结晶器出口坯壳温度取 1 000~1 100 ℃较为适中[15]，此时结晶器出口坯壳安全厚度为 10.04~11.23 mm，因而建议高拉速板坯结晶器出口坯壳安全厚度≥10 mm 即可。

表 3　不同温度下结晶器出口坯壳安全厚度[14]

Tab.3 Safe shell thickness of the mold outlet at different temperatures[14]

结晶器出口坯壳温度 /℃	SS400 钢种屈服强度 /MPa	许用应力 /MPa	坯壳安全厚度 /mm
950	29	11.6	9.33
1 000	25	10.0	10.04
1 050	22	8.8	10.71
1 100	20	8.0	11.23
1 150	18	7.2	11.84
1 200	15	6.0	12.97

2.2　结晶器凝固系数

连铸机最大拉速与结晶器凝固系数 K_m 呈正相关，K_m 可通过下式计算得到[4]：

$$K_m=1\ 000\left[\frac{2\times60\times\lambda(t_m-t_{sf})}{L_f\rho_{sh}}\right]^{0.5} \tag{4}$$

式中，λ 为凝固坯壳导热系数，W/(m·℃)；t_m 为凝固温度，可取钢液的固相线温度，℃；t_{sf} 为凝固坯壳表面温度，℃；L_f 为凝固潜热，J/kg；K_m 为结晶器凝固系数，通常板坯、大方坯和小方坯分别取 17~22、22~28 和 20~26 mm/min$^{0.5}$。

假定与结晶器铜壁接触的凝固坯壳温度保持不变，则凝固系数 K_m 可由式(5)确定[16]：

$$\frac{K_m}{2\sqrt{\alpha}}\exp\left(\frac{K_m}{4\alpha}\right)\mathrm{erf}\left(\frac{K_m}{2\sqrt{\alpha}}\right)=(t_m-t_{is})\frac{C_p}{L_f\sqrt{\pi}} \tag{5}$$

取 α=0.624×10^{-5} m^2/s、C_p=670 J/(kg·K)、L_f=2.71×10^5 J/kg、t_m=1 530 ℃、t_{is}=1 000 ℃时，可得板坯结晶器凝固系数 K_m 最大值≈25 mm/min$^{0.5}$。凝固坯壳表面温度 t_{sf} 越低，K_m 越大，这与结晶器的传热效率有关，其水腔结构、水流速、表面状态与保护渣性能等都会影响到铜壁与初生坯壳之间的界面传热。

Suzuki 等[17]通过 SSCT 法测定初生坯壳(厚度 2~5 mm)抗拉强度约 1~3.5 MPa，将其与结晶器内坯壳和铜板之间摩擦力进行对比，推断出板坯连铸机采用正弦振动时极限拉速 8.5 m/min(是当今薄板坯连铸机实际操作水平 140%)，如图 2 所示，一旦超出则坯壳会开裂甚至漏钢。由此可见，常规板坯铸机的拉速提升还有相当大的潜力可以挖掘。

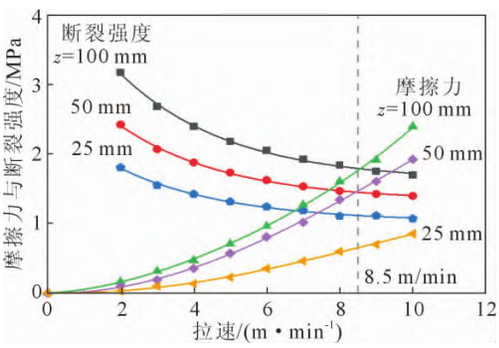


图 2　板坯连铸机极限拉速[17]

Fig.2　Ultimate casting speed of the slab caster[17]

3　高拉速板坯连铸关键技术

高拉速板坯连铸技术的应用主要在日本，其典型铸机基本参数如表 4 所示[18]。尽管各铸机在细节参数上存在差异，但其共同特点是均配备了大容量中间罐(60~90 t)、高效结晶器、冶金长度大于 40 m、优良的液面控制系统、SEN 保护浇注、非正弦振动、漏钢预报、电磁制动等核心技术，如图 3 所示，下面逐一阐述。

3.1　高效强冷结晶器

如图 4~5 所示，虽然增加了结晶器内的热通量，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 4　日本典型高效板坯连铸机主要技术参数[18]

Tab.4 Main technical parameters of typical Japanese high efficiency slab caster[18]

钢企	Nippon Steel 新日本制铁公司			NKK 日本钢管公司		Kawasaki 川崎制铁	Sumitomo 住友金属	Kobe 神户制钢
连铸机	Ohita 大分 NO.4	Nagoty 名古屋 NO.2	Kimitsu 君津 NO.3	Fukuyama 福山 NO.5	Fukuyama 福山 NO.6	Mizushima 水岛 NO.5	Kashima 鹿岛 NO.3	Kakogawa 加古川 NO.4-2
机型	立弯式	立弯式	立弯式	立弯式	立弯式	立弯式	立弯式	立弯式
中包容量/t	70	60	60	80	80	70	65	80
流数	2	2	2	2	1	2	2	1
结晶器长度/mm	950	900	900	950	950	900	900	900
铸坯厚度/mm	280	245	240	220	220~300	220	220	230/230
铸坯宽度/mm	1 950	1 300	1 500	700~1 650	675~2 100	850~1 900	700~1 600	900~1 800
冶金长度/m	44.5	48.4	43.0	42.1	49	45	42.7	40.5
LC/ULC 低碳/超低碳铝镇静钢拉速/(m·min^{-1})	1.5	2.0	1.8	2.5	2.5	2.5	2.3	2.0
MC 中碳钢拉速/(m·min^{-1})	1.5	-	-	1.8	2.0	1.8	1.8	2.0
设计最高拉速/(m·min^{-1})	1.6	2.5	-	3.0	3.0	2.5	2.5	-

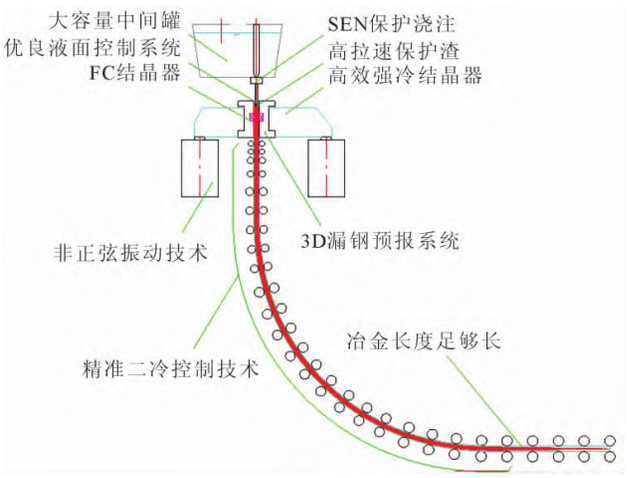


图 3　高拉速连铸关键技术示意图[18]

Fig.3　Schematic diagram of key technologies of high speed continuous casting[18]

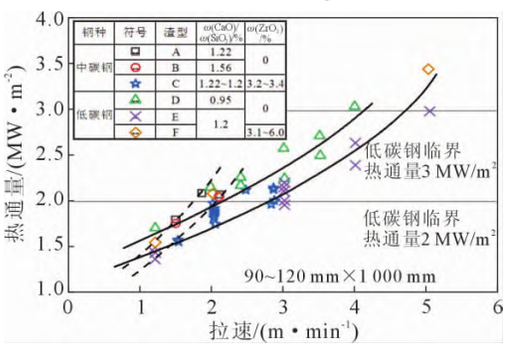


图 4　拉速对结晶器内热通量的影响[19]

Fig.4　Influence of casting speed on heat flux in mold[19]

但是钢液凝固时间与保护渣消耗量与拉速的增加呈负相关[19-20]。所以总体来说,结晶器内坯壳厚度随着拉速的增加而减小,初生坯壳的不均匀性也会加

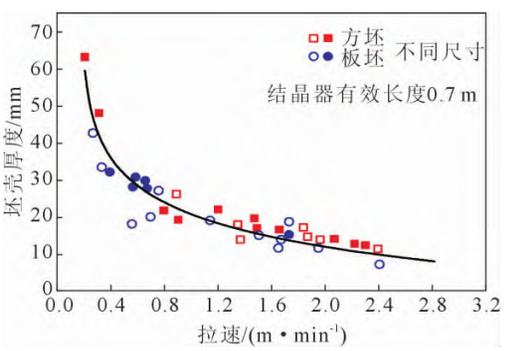


图 5　出结晶器的坯壳厚度与拉速的关系[20]

Fig.5　The relationship between the mold shell thickness and casting speed[20]

大,这就增加了卷渣、夹渣等表面缺陷的风险,使得潜在的裂纹源增多,更严重时还会导致漏钢事故;其中质量恶化和漏钢频发严重影响生产顺行，成为最大挑战。为了实现高效连铸技术,需要通过改善高拉速条件下结晶器的传热效率来保证坯壳的均匀性,重点在于优化结晶器内腔结构、冷却制度、润滑机制等,关键在于结晶器液位的稳定控制[4]。

高效强冷板坯结晶器技术应具有如下特征:

(1)具有更高的传热效率:结晶器铜板具有更合适的水槽结构,其面积、孔径、间距等可以保证冷却水的流量与流速满足高效换热的要求，无间隙铜板散热更加快速高效。

(2)强制冷却更加均匀:采用连弯型水槽铺设方式,既增加铜板冷却面积,又增强角部与面部冷却均匀性。

(3)采用新型铬锆铜板材质与 Co-Ni 镀层技术:

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

保证铜板传热效率，增强镀层抗磨性能。

(4)结晶器铜板热面最高温度低于 250 ℃，角部温度与中部温度差尽可能缩小。

(5)加大结晶器窄面冷却水量来减弱高拉速时窄面鼓肚量，确保水流速≤9 m/s 避免发生局部沸腾。

蔡兆镇等[21]从理论上定量描述了板坯连铸过程结晶器内气隙、保护渣以及凝固坯壳角部表面温度的分布规律——弯月面下方约 200 mm 处以及结晶器出口处的温度分别为 1 120 ℃与 1 000 ℃，此温度下 Nb(C/N)与 B(C/N)等第二相粒子沿着铸坯表层粗大的奥氏体晶界大量析出，易导致角部裂纹的发生。为避免这一缺陷的发生，特研发出 ICS-Mold (Interior Convex Surface Mold)结晶器，其内腔曲面具有“上部快补偿、中下部缓补偿、角部多补偿”的特点。这种结晶器的内腔形状符合铸坯的凝固特性，为铸坯角部提供了 10 ℃/s 以上的冷却速度，比普通结晶器多了两倍，快速冷却有效抑制了第二相粒子的大量析出，减少了铸坯角裂的风险。此外，该结晶器楔形曲面有利于铸坯角部收缩，减少了铸坯与铜板之间的气隙厚度，有效提高了换热效率，保证了坯壳的均匀生长，减少了结晶器下部铜板的磨损，提高了铜板寿命(通钢量达 8~10 万吨)。该种结晶器结合高拉速的特点，从根本上解决了结晶器内坯壳不均匀导致的铸坯缺陷，为新型高拉速结晶器的设计提供了思路。

3.2　结晶器内钢液流动控制

结晶器内会发生一系列质量、热量、动量传输，复杂的液–固、固–固相变，还会发生较大的应力作用，如图 6 所示。其内部的热量传输尤为重要，决定了铸坯的质量、成材率以及最终产量，其内部的温度分布和热流量最终决定着铸坯的质量和铸机的生产能力，结晶器的核心作用就是控制凝固坯壳均匀生长。高拉速条件下，结晶器内钢液流股的运动更加剧烈，这增加了钢液与空气接触以及卷入保护渣的机会，进而会导致钢液中生成较大的外来夹杂物，最终产品表面或内部会产生严重的缺陷。合理控制结晶器内钢液的流场，不仅可以控制卷渣，减少铸坯表面和皮下的夹杂物和气泡，还可以更好地控制弯月面附近的温度，促使坯壳生长均匀，减少铸坯缺陷。

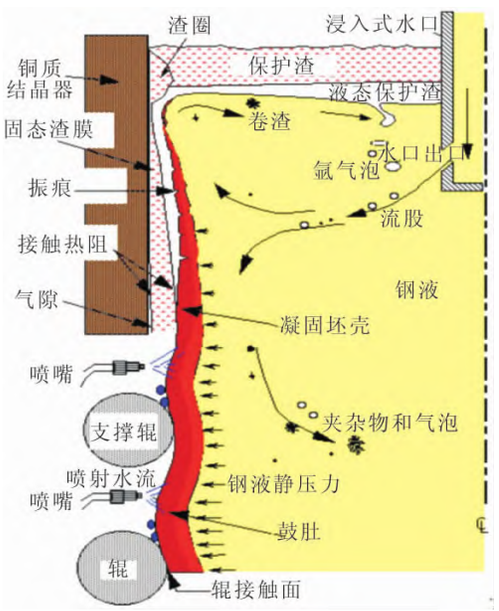


图 6　高拉速结晶器多相流行为示意图[4]

Fig.6　Schematic diagram of multiphase behavior of mold with high casting speed[4]

为了避免高拉速条件下可能导致的冷轧薄板钢种易卷渣和包晶钢易产生表面纵裂，甚至是漏钢风险，中国与欧美钢厂一般均采用低拉速进行连铸生产。尤其是对于板坯高拉速连铸而言，钢液卷渣后不仅容易扰动弯月面，导致坯壳生长不均匀、润滑效果下降，而且还会导致轧板产品产生较严重的现状缺陷，严重影响铸坯成材率与企业经济效益。卷渣行为与结晶器液面波动的剧烈程度有关，Iguchi 等[22]利用水模型得出卷渣的主要原因有：①液面波动过大导致卷渣；②表面流速过大导致剪切卷渣，业界公认最佳的表面流速范围为 0.3~0.4 m/s；③结晶器内流场的偏流与不对称导致漩涡卷渣；④吹入钢液的氩气泡会扰动保护渣 / 钢液界面引起气泡卷渣；⑤液面失稳导致卷渣。

日本 NKK 公司的 Teshima 等[23]通过研究连铸工艺参数对结晶器液面波动的影响，提出了反应其剧烈程度的指数 F，由下式计算得到：

$$F=\frac{\rho_{st}Q_LV_e(1-\sin\theta)}{4D} \tag{6}$$

式中，ρ_{st} 为钢液密度，kg/m^3；Q_L 为钢液体积拉速，m^3/s；V_e 为钢液主流股的冲击速度，m/s；θ 为钢液主流股的冲击角度，°；D 为冲击点到自由液面的距离，m。

各物理量符号释义如图 1 所示，通过改变水口角度、插入深度、氩气流量、电磁制动等连铸控制参数将 F 值控制在 1.7~3.0 的最佳范围，可以有效避免结晶器液面波动导致的卷渣行为。

随着设备与工艺的技术进步，铸坯冶金长度逐渐延长，结晶器保护渣成分控制更加精细化，漏钢预报系统等的应用也成为必要的生产控制手段，因此高拉速技术发展的主要突破点就是抑制结晶器卷渣。其中，优化浸入式水口结构是控制结晶器内流场的直接手段。

熊霄等[24]针对水口形状对板坯结晶器内流场的影响进行了实验研究，结果表明，在同一条件下，相

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对于凸形水口，凹形水口流出的流股在结晶器液面附近流速更小，对其波动影响更小。在拉速大于1.8 m/min时，水口出口的角度偏上则可以避免产生较大的漩涡流。综合而言，采用凹形水口，并且保证上下出口角度分别为40°与-15°为最佳方案，此时结晶器表面钢液流速为0.27 m/s。

邓小旋等[25]对板坯结晶器液面的瞬态特征进行了实验研究以及工业验证，结果表明，板坯连铸结晶器内流场存在周期性变化，浇注时每20~30 s会出现~5 s的“周期性畸变”，此时结晶器窄面附近液面激荡凸起而宽度1/4处液面下凹，同时钢液表面速度达到极值。拉速从1.8 m/min增至2.4 m/min，畸变周期从25 s降至17 s；浸入深度从110 mm提高至170 mm，畸变周期从21 s增至25 s；水口倾角从15°增至30°，畸变周期从25 s增至35 s。由此可知，水口倾角、拉速与水口浸入深度对这一周期性变化的影响效果越来越小，因此水口倾角设计是改善高拉速结晶器内流畅的有效手段。

黄琦等[26]针对结晶器内坯壳对于流场以及卷渣行为的影响进行了水模拟实验研究，结果表明，由于坯壳的存在，钢液的下部流动空间较小，流股能量更多聚集于上部空间，增大了此处的湍流行为，因此流场也更加不对称。相对于不考虑坯壳的情况，此情况下液面的流速及其波动分别增加了3.5%与3.1%。

3.3 结晶器润滑机制

为了保证高拉速连铸的顺行与产品质量，需要保证结晶器与铸坯之间的充分润滑，这也就涉及到保护渣本身的性能调控以及结晶器振动方式的控制，这也是高拉速连铸的先决条件。

3.3.1 拉速连铸保护渣

Suzuki[27]给出了传统板坯保护渣消耗与拉速的关系，如图7所示。在正弦振动情况下，拉速低于2 m/min时，保护渣消耗量随着拉速的提高而迅速减少，拉速高于2 m/min后，保护渣消耗量随着拉速的提高缓慢减少；在非正弦振动情况下，保护渣消耗量随着拉速的提高缓慢减少。在同一拉速水平下，非正弦振动的保护渣消耗量比正弦振动更多一些。不论是何种振动方式，随着拉速的提高，结晶器渣膜都会变薄，发生黏结性漏钢和铸坯裂纹的风险都会增加。

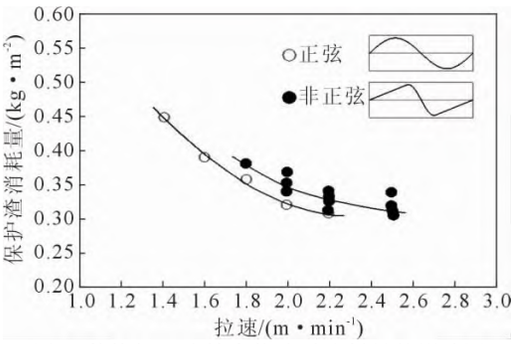


图7 传统板坯连铸中拉速对渣耗量的影响[27]
Fig.7 Influence of casting speed on slag consumption in traditional slab continuous casting[27]

结晶器铜板与凝固坯壳间的摩擦力f_l的计算方法如式(7)所示，f_l与保护渣黏度、拉速呈正相关，与保护渣膜厚度呈负相关[27]。在非正弦振动模式下，正滑脱时间增加，因此高拉速条件下保护渣消耗量能够得到维持，有利于结晶器润滑。实践表明，黏度与拉速的乘积($\eta \cdot V_c$)控制在0.10~0.40 (Pa·s·m/min)时，保护渣膜厚度的变化和热流波动最小。

$$f_l=\eta\frac{V_m-V_c}{60d_l}=\eta\frac{\pi fh\cos(2\pi ft/60)-V_c}{60d_l} \tag{7}$$

式中，f_l为凝固坯壳与结晶器铜板间的液体摩擦力，Pa；η为保护渣1 300 ℃时的黏度，Pa·s；d_l为保护渣的液态渣膜厚度，mm；V_c为拉速，m/min；V_m为结晶器振动速度，m/min。h为结晶器振动冲程(两倍于振幅A)，mm；f为结晶器振动频率，cpm；t为时间，s。

因此，高拉速板坯连铸用保护渣应具有以下理化特性：

(1)低黏度　通常板坯拉速$V_c \geqslant 1.5$ m/min时，黏度η在0.05~0.15 Pa·s；拉速$V_c < 1.5$ m/min时，黏度η在0.1~1.0 Pa·s。

(2)低熔化温度≤铸坯出结晶器时中心表面温度(1 050 ℃)保护渣熔化速度加快有利于补充铜板与坯壳之间的气隙，保证渣膜厚度维持在10~30 mm。

(3)润滑性能良好　高的液渣流入能力，能获得较大的渣耗量，厚度足够并且均匀的渣膜有利于结晶器润滑与均匀传热，减少铸坯角裂发生的可能性。保护渣的软化、凝固和结晶温度应该较低。

(4)高的物性稳定能力　即使充分溶解、吸附夹杂物后仍能保持稳定的使用性能。

(5)适宜的析晶率与析晶温度　有利于减小摩擦力，还可有利于控制包晶钢等钢种钢热流要求的。

(6)适宜的渣耗量　这与结晶器润具有直接的关系，朱立光[28]提出的渣耗量回归方程式(8)可为生产试验提供参考和依据。常规拉速连铸、薄板坯连铸与高拉速连铸的渣耗量应分别大于0.30 kg/m²、0.15 kg/m²与0.23 kg/m²。尤其是在结晶器表面发生较大的波动时，还要保证有足够的渣耗量。

$$Q_s=0.74\frac{60}{fA^{0.3}}(10\eta V_c^2)^{-0.5}+0.17 \tag{8}$$

式中，Q_s为保护渣的消耗量，kg/m²；A为结晶器振幅，mm。

3.3.2 非正弦振动技术

为克服结晶器渣耗量下降而引起的润滑不良和

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

解决顺利脱模等问题,矩形波、正弦波等直至非正弦振动技术被国内外广泛应用。如图 8 所示,非正弦振动速度曲线突破了传统振动曲线上下对称的桎梏,在路程上比正弦曲线有了一定的偏斜率,同时还保证了平滑变化的特点、限制了瞬时加速度的增加。非正弦振动增加了负滑脱时间,有利于铸坯润滑与顺利脱模,而且振动模式多变,在保证位移不变的情况下可以通过调整参数获得不同的振动方式,适应性更强。

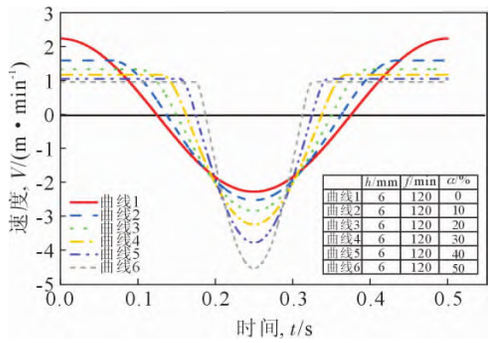


图 8 结晶器非正弦振动速度曲线[29]

Fig.8 Nonsinusoidal oscillation velocity curve of mold[29]

因此,结晶器非正弦振动已成为实施高拉速连铸和提高铸坯质量的关键技术。负滑脱时间(t_n)合理取值不仅保持了一定的负滑脱量(negative slip advanced, NSA),有利于弯月面初凝坯壳在正滑脱拉伸以后被负滑脱挤压愈合,而且可以有效减轻振痕深度。而增加正滑脱时间(t_p)则有助于保护渣填补气隙形成渣膜,提高结晶器润滑效率。

振频(f)升高使 t_n 在进一步减小的同时 NSA 有所提高,但却带来 t_p 明显减小与正滑脱速度差(ΔV)显著提高的不利影响。为避免振频 f 过高造成冲击,应在保证合适 t_n 的同时取 f 的下限;即可通过降低结晶器振动频率来保证保护渣消耗量[30]。

振程(h)每提高 1 mm,ΔV 随之增加 0.25 m/min 左右,NSA 也会显著提高。即 V_c 提高 h 应适当增加,不使 $Z=h/V_c$ 值过小;低 V_c 时不使 Z 值过大以获得较短 t_n,控制保护渣耗量在合理范围[31]。

当 V_c 小于 1.8 m/min 时,t_v 随波形偏斜率(α)增大而减小;V_c 大于 1.8 m/min 时,t_n 随 α 增大而增大[32];当波形偏斜率 α 由 0 升至 0.4 时,t_n 变化幅度均在 0.05 s 以内,NSA 增加 1 mm,ΔV 随 α 增加而逐渐减小。因此随拉速提高,适当增大 α 可改善振动效果,但不宜过大避免振动加速度剧烈增加,这也是控制 α 小于 0.4 的原因[33]。

V_c 提高使得 t_n 减小而 t_p 增加,这延长了保护渣补充时间、有利于结晶器润滑,但是同时 NSA 的减小和 ΔV 的增加不利于铸坯质量[34]。如图 9 所示,结

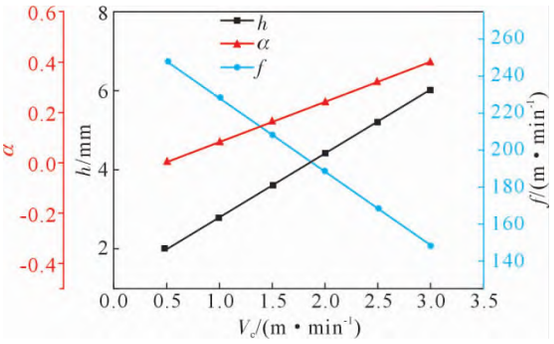


图 9 高拉速连铸结晶器振动同步控制模型[34]

Fig.9 Oscillation synchronous control model of high casting speed continuous casting mold[34]

晶器振动同步控制模型为高拉速连铸的生产提供了理论支撑:t_n 与 V_c 和 f 呈负相关,但是与 h 呈正相关,因此提高拉速 V_c 后,可以通过适当减小 f 与增加 h 来保证 t_n 的最佳取值范围,以此来保证一定的 NSA 值并减轻振痕的发生。相较而言,t_n 对 V_c 和 f 的变化更敏感,对 h 的变化相对不敏感,因此通过控制前者数值可以更好地增加振动过程保护渣的消耗量,改善结晶器润滑条件。此外,h 增加有利于增加 NSA,可以在不过分影响 t_n 的前提下缓和 V_c 增加和 f 减小对 NSA 的负面影响,有利于铸坯愈合;f 减小可以显著增加 ΔV 的值,缓和 V_c 和 h 增加对其带来的负面影响,有效减少坯壳拉应力;α 增大对各工艺参数改善均起到一定作用;在高拉速下减小 f 值利于延长设备寿命。

3.4 二冷精准控制技术

当铸坯由结晶器进入二冷区时,坯壳仍很薄,需继续通过实施喷淋冷却来加速凝固。二冷水强度选择不当会诱发凹陷、鼓肚、菱变、中心偏析等缺陷,二次冷却不均易产生各种裂纹,而控制上述质量缺陷最为有效的手段就是二冷工艺。相比较于传统连铸,随着拉速提高,铸坯在二冷区内停留时间更短,坯温升高,坯壳厚度减薄,辊间鼓肚量增大,二冷区需传递出更多热量。但是普通喷嘴的压力较低、水滴直径小,难以渗透铸坯表面的蒸气膜,不能有效改善二冷传热效果。所以,通过对二次冷却区各段水量的动态控制及合理分配来提高善其热量传递效率是高拉速连铸的重要研究方向。当今,连铸二冷水动态控制方法主要有:

(1)基于拉速关联的静态配水　基于铸机拉速与配水量的函数关系实时计算当前状态下合适的水量,并且输入可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)实现水量的调整。此方法控制简便,目前国内外许多企业均采用此种控制方式。不过其缺点是,当拉速产生突变时,水量会突然变化,这就

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

会导致铸坯表面产生较大的温度波动[35]。

(2)基于有效拉速的动态配水　此方法将铸坯切分为多个区域，通过追踪其时实位置与生存时间来确定局域有效拉速，进而确定局域所需的配水量，可以有效避免水量突变导致的铸坯表面温度的剧烈波动[36]。

(3)基于铸坯表面实测温度的动态配水　此方法通过控制系统（如 proportional integral derivative, PID)对二次冷却各区域的配水量进行控制，保证局域内铸坯表面温度趋近于模型预设温度，这可以有效避免非稳态状态下铸坯表面的温度波动[37]。该方法的典型代表是芬兰 Rautaruukki 的 DYNCOOL 模型和 VAI 的 DYNACS 系统。

当连铸二冷采用上述静态配水或旧式动态配水技术时，存在以下弊端：

(1)二次冷却区内充满大量温度较高的水蒸气，而且铸坯表面存在一薄层水膜以及氧化铁皮，这都会影响到铸坯表面温度测定的准确性。

(2)虽然使用数值模拟方法对现场铸坯的热量传输行为进行计算与预测较为准确，但是其边界条件较多、计算量较大，很难确保现场使用的准确性。

(3)二冷静态配水的冷却水量仅与拉速有关，存在非稳态状况下铸坯热滞后和表面温度波动过大问题。

(4)传统的动态配水技术是二维模型，容纳不了复杂的边界条件，无法考虑冷却水量在铸坯宽度方向分布应呈不均匀状态。

(5)具有幅切功能的铸机，其边部的冷却水量往往是通过中心的冷却水量乘以一修正系数，该修正系数全凭经验来定。

(6)连铸坯表面横裂纹、角横裂纹发生率冬季明显高于夏季，首罐钢明显高于其他罐钢，即传统的二冷工艺没有考虑季节、浇注周期配水对铸坯表面质量的影响。

近年来，张炯明等[38]针对板坯连铸开发出了可以在实际生产中应用的三维动态配水软件，用于精确模拟板坯内部热量传输，并配合优化后的喷嘴与幅切工艺以实现二冷精准控制。该模型考虑季节变化影响、喷嘴分布效果以及浇注过程不同阶段的状态，通过数据测定修正了该铸机的换热系数，并据此设置了计算边界条件。如图 10 所示，该软件通过快速、准确地模拟计算，给出了连铸板坯的实时状态，通过铸坯边部与中心的温度指导二次冷却配水量。最终减轻了凝固末端“W”型的缺陷，减少了铸坯三角区的裂纹，还改善了铸坯宽度 1/4 处的铸坯质量。

3.5　FC 结晶器技术

众所周知，提高拉速会导致结晶器内流场紊乱程度加剧，使其液面波动更大，进而造成卷渣甚至会发生漏钢事故。因此优化结晶器内的流场成为高效连铸的必要手段。近年来，电磁冶金技术迅速发展，并且逐渐应用于板坯高拉速结晶器以控制其流场。较新的电磁冶金技术包括：双边行波磁场的 M-EMS (mold-electric magnetic stirring)、局部区域磁场的 EMBr(electric magnetic break)、全幅一段磁场的 LMF(level magnetic field)、全幅二段磁场的 FC-mold (flow control mold)、电磁水平加速器的 EMLA(electric magnetic level accelerator)、电磁水平稳定器的 EMLS(electric magnetic level stabilizer)等。

FC 结晶器是日本川崎 JFE 和 ABB 公司合作开发的第二代全幅二段电磁制动设备。FC 结晶器具有两个水平静磁场，磁场长度超过结晶器宽度，其上部磁场分布在弯月面附近，用于减轻弯月面附近钢液的动能、抑制其流动；另一个磁场分布在结晶器下部，用于控制钢液主流股对结晶器窄面的冲击速度及其冲击深度。配备了 FC 结晶器的铸机详细参数见表 5。2013 年，ABB 公司推出新一代电磁制动设备(FC Mold G3)，这一设备仍然保持上下两组线圈，具有以下 3 种模式：直流模式，两组线圈都通入直流电源，与 FC Mold 类似；交流模式，仅上线圈通交流电源，供低拉速使用，在弯月面形成旋转流场冲刷凝

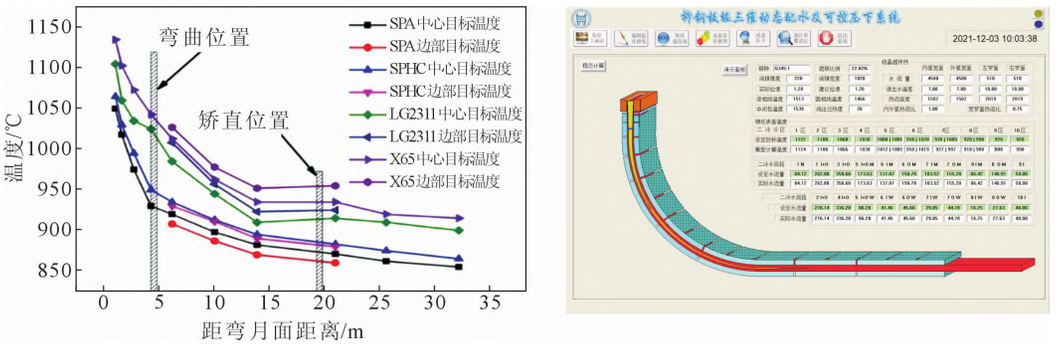


图 10　三维二冷动态配水系统[38]

Fig.10　3D dynamic control of secondary cooling water[38]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 5 配备 FC 结晶器的连铸机参数

Tab.5 Parameters of the continuous caster equipped with the FC mold

连铸机	梅山 NO.2	宝钢 NO.4	邯宝 NO.1	首钢京唐 NO.3	马钢四钢轧 NO.1	鲅鱼圈 NO.2	JFE 福山厂 NO.3	韩国浦项光阳钢厂 NO.2
机型	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)
钢包容量/t	150	250	250	300	300	260	-	-
弧形半径/mm	8	9.5	9.5	9.5	9.59	8	-	-
结晶器长度/mm	900	900	900	900	900	900	-	950
铸坯厚度/mm	210/230	230	230/250	230/250	230/250	200/230	220	250
铸坯宽度/mm	900~1 320	900~1 750	900~2 150	900~1 650	900~2 150	750~1 450	~1 250	~1 600
冶金长度/m	41.3	41.36	39.3	43.5	42.6	34	42.1	47
设计拉速/(m·min^{-1})	2.4	2.2	2.03	2.5	2.5	2.05	2.8	-
实际拉速/(m·min^{-1})	1.8	1.7	1.5	2.05	1.8	1.8	2.5	2.5

固前沿夹杂物,改善表面质量;组合模式,上部线圈通入交流电,下部线圈使用直流电,可降低流股冲击深度,提高弯月面温度等[39]。

基于结晶器内强度适中的双股流是最优流态的控制理念,2003 年 JFE 联合 Rotelec 公司开发出多模式电磁搅拌器(Multi-Mode EMS):当结晶器流场为单股流或较弱双股流时使用 EMLA 将流场加速成强度适中的双股流;当流场为强度较高双股流时使用 EMLS 将流股减速成合理强度的流场;第 3 种电磁冶金功能是搅拌结晶器上部的钢液,使其旋转并冲刷凝固前沿的夹杂物/气泡[40]。即高拉速连铸电磁制动设备均朝着“多模式”、“多功能”发展,电流也从单纯的“直流、交流”发展成“直流+交流”模式,冶金功能也由传统的“制动”发展成“加速+制动+搅拌”。

表 5 中的首钢京唐 NO.3 铸机于 2012 年正式投用 FC 结晶器,其使用效果如图 11 所示。从水口流出的钢液流股受到磁场作用的限制,其冲击深度较浅,弯月面附近钢液流股的速度也因磁场作用而降低,因此结晶器内钢液温度也更加均匀,且结晶器表层液面受到的剪切力更小、波动也更小。由图 11 可知,相较于常规结晶器,使用 FC 结晶器的情况下其液面波动更小,前者拉速 2.5 m/min 情况与后者拉速 1.8 m/min 情况时的结晶器液面波动情况相当[8]。结晶器液面波动情况减缓后,钢液卷渣更少,铸坯表面夹渣缺陷得以改善;保护渣消耗量更多,更有助于铸坯脱模,且有利于减少表面裂纹的发生。

黄财德等[41]针对 FC 结晶器的结构与工艺优化做了实验研究与工业验证,结果表明:结晶器下部区域受到的电磁力作用与浸入式水口角度、插入深度和铸坯拉速呈明显的正相关,可以据此有效减小结晶器下部窄面受到的钢液冲击作用;同时结晶器两侧钢液流场更加均匀,液面波动更加平缓,钢–渣界面也更加清晰。结晶器液位波动在下磁场强度为上磁场强度的 2 倍时最小,此时夹杂物数量大幅减少,Al_2O_3 类缺陷与保护渣类缺陷分别减少 77.8%与 82.6%;凝固钩(hook)的生长得到抑制,其平均深度与平均长度分别由 2.3 mm 与 2.3 mm 降低至 1.7 mm 与 2.0 mm。通过对 FC 结晶器的结构与工艺优化,最

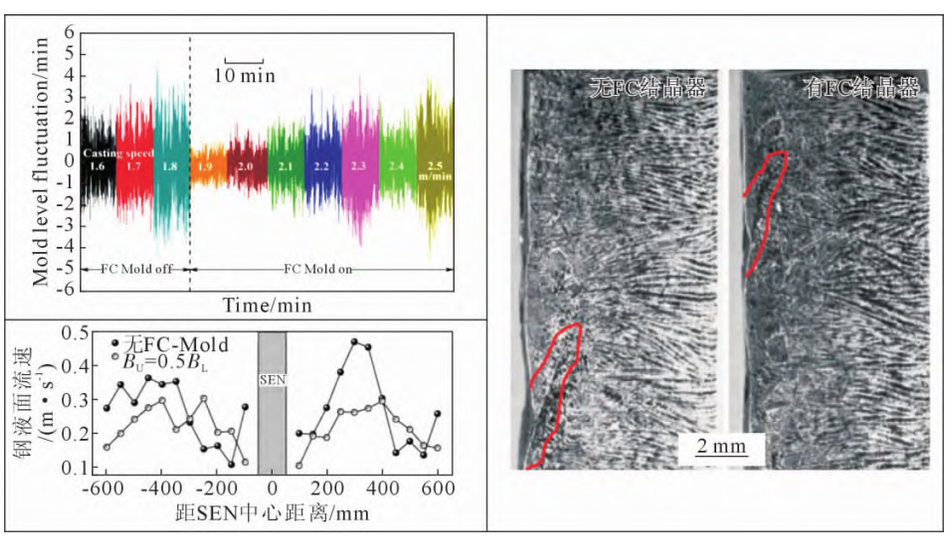


图 11 FC 结晶器的冶金效果对比[8]

Fig.11 Comparison of metallurgical effects of the FC mold[8]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

终实现镀锡板 2.05 m/min 的常态化生产。

4 结语与展望

(1)以高拉速为主题的高效连铸倍受各界青睐，其不但缩短了浇注周期，实现了小规格铸坯或品种钢生产时的炉机匹配，还可以大幅降低生产投资、减少物资与能源消耗、提高生产率，符合当今钢铁工业绿色低碳发展所需，高拉速已成为现代连铸发展的重要方向。

(2)采用高效强冷结晶器、高拉速保护渣、非正弦振动等技术，可改善结晶器传热和润滑，防止漏钢；通过 FC 结晶器控制结晶器内钢水流动状态来抑制液面波动、防止卷渣；三维动态配水则实现了二冷精准控制，解决了高拉速板坯稳定生产的技术难题，可为同类连铸机的建设提供了参考和借鉴。

(3)高拉速的实现是一项集工艺、装备、生产操作与自动化控制于一体的综合性技术：其先决条件是严格的铸坯质量，基本条件是最优的连铸工艺，必要条件是精良的设备操作与维护。

(4)尽管以首钢京唐 No.3 CCM 为代表的常规板坯铸机在低碳、超低碳钢等冷轧钢种上的拉速成功突破 2.05 m/min，但高效强冷结晶器、抑制卷渣与电磁冶金等高拉速连铸关键技术尚有潜力可挖，包晶钢与品种钢的拉速提升将是今后重点的攻关方向。

参考文献：

[1] 陈阳，周干水，邹旭，等. 三机三流直弧形板坯连铸机核心装备技术的开发与应用[J]. 铸造技术，2022, 43(3): 217-223.
CHEN Y, ZHOU G S, ZOU X, et al. Development and application of core equipment and technology of three-strand straight-arc slab continuous caster[J]. Foundry Technology, 2022, 43(3): 217-223.

[2] 朱苗勇. 新一代高效连铸技术发展思考 [J]. 钢铁，2019, 54(8): 21-36.
ZHU M Y. Some consideration for new generation of high-efficiency continuous casting technology development [J]. Iron & Steel, 2019, 54(8): 21-36.

[3] 朱立光，郭志红. 高速连铸技术研究[J]. 河北冶金，2021(6):1-10.
ZHU L G, GUO Z H. Research and application of high speed continuous casting technology[J]. Hebei Metallurgy, 2021(6): 1-10.

[4] 朱苗勇. 高拉速连铸过程传输行为特征及关键技术探析[J]. 钢铁，2021, 56(7), 1-12.
ZHU M Y. A study of transport phenomena and key technologies for high-speed continuous casting of steel [J]. Iron & Steel, 2021, 56(7): 1-12.

[5] LI L P, WANG X H, DENG X X, et al. Application of high speed continuous casting on low carbon conventional slab in SGJT [J]. Steel Research International, 2014, 85(11): 1490-1500.

[6] 李金柱，王胜东. 板坯连铸高拉速生产实践[J]. 连铸，2014, 191(3):1-6.
LI J Z, WANG S D. Production practice for high speed continuous casting slab[J]. Continuous Casting, 2014, 191(3): 1-6.

[7] 朱国森，季晨曦，刘洋，等. 首钢板坯连铸技术进步[J]. 中国冶金，2019, 29(8): 1-7.
ZHU G S, JI C X, LIU Y, et al. Progresses of continuous casting technology development at Shougang Group[J]. China Metallurgy, 2019, 29(8): 1-7.

[8] 李林平，王新华，邓小旋，等. 首钢京唐板坯高拉速生产的控制技术[J]. 炼钢，2014, 30(6): 22-27.
LI L P, WANG X H, DENG X X, et al. High speed casting of 2.5 m/min on SGJT No.3 slab caster[J]. Steelmaking, 2014, 30(6): 22-27.

[9] 任志鑫，李洪波，刘晓利. 高拉速下开浇板坯纵裂缺陷控制[J]. 甘肃冶金，2021, 43(5): 56-58.
REN Z X, LI H B, LIU X L. Control of longitudinal crack defects of cast-in slab at high speed[J]. Gansu Metallurgy, 2021, 43(5): 56-58.

[10] 刘启龙，曹成虎，邓勇，等. 亚包晶钢板坯高拉速生产实践[J]. 炼钢，2021, 37(4): 25-29.
LIU Q L, CAO C H, DENG Y, et al. High casting speed production practice of hypo-peritectic steel slab[J]. Steelmaking, 2021, 37(4): 25-29.

[11] 邓勇，杨利彬，汪成义. 马钢低碳钢板坯高拉速连铸技术的应用[J]. 连铸，2022, 239(1): 72-77.
DENG Y, YANG L B, WANG C Y. Application of high-speed continuous casting technology for low carbon steel slab in Masteel [J]. Continuous Casting, 2022, 239(1): 72-77.

[12] 蔡开科，程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京：冶金工业出版社，1994.
CAI K K, CHENG S F. Principle and technology of continuous casting steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.

[13] ITO Y, NABESHIMA S, MIKI Y, et al. Evaluation of solidified shell thickness by thermocouple in mold[J]. ISIJ International, 2019, 59(12): 2239-2246.

[14] QIAN H T, HE F, XIE X A, et al. Recovery mechanism of the sticking-type breakout during continuous casting of steel[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(3): 259-268.

[15] SEMPLICI S, KARAN R, MAPELI C. DiaMold® design of corners in billet high speed continuous casting[J]. La Metalurgia Italiana, 2005, 97(1): 9-15.

[16] POIRIER D R, GEIGER G H. Transport phenomena in materials processing[M]. Switzerland: Springer, 2016.

[17] SUZUKI M, SUZUKI M, YU C H, et al. In-situ measurement of fracture strength of solidifying steel shells to predict upper limit of casting speed in continuous caster with oscillating mold[J]. ISIJ International, 1997, 37(4): 375-382.

[18] SUZUKI M, SUZUKI M, NAKADA M. Perspectives of research on high-speed conventional slab continuous casting of carbon steels[J]. ISIJ International, 2001, 41(7): 670-682.

[19] KANAZAWA T, HIRAKI S, KAWAMOTO M, et al. Behavior of lubrication and heat transfer in mold at high speed continuous casting[J]. Tetsu-to-Hagane, 1997, 83(11): 701-706.

[20] 干勇. 现代连续铸钢实用手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2010.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

GAN Y. User manual for modern continuous casting of steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010.

[21] 蔡兆镇，朱苗勇. 板坯连铸结晶器内钢凝固过程热行为研究[J]. 金属学报，2011, 47(6): 671-677.
CAI Z Z, ZHU M Y. Simulation of thermal behavior during steel solidification in slab continuous casting mold[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(6): 671-677.

[22] IGUCHI M, YOSHIDA J, SHIMIZU T, et al. Model study on the entrapment of mold powder into molten steel[J]. ISIJ International, 2000, 40(7): 685-691.

[23] TESHIMA T, KUBOTA J, SUZUKI M, et al. Influence of casting conditions on molten steel flow in continuous casting mold at high speed casting of slabs[J]. Tetsu-to-Hagane, 1993, 79(5): 576-582.

[24] 邓小旋，熊霄，王新华，等. 高拉速板坯连铸结晶器浸入式水口的水模型研究[J]. 北京科技大学学报，2013, 35(10):1304-1312.
DENG X X, XIONG X, WANG X H, et al. Water modeling study on submerged entry nozzles in continuous slab casting molds for high speed casting[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(10): 1304-1312.

[25] 邓小旋，季晨曦，何文远，等. 板坯连铸结晶器液面的周期性瞬态特征[J]. 钢铁，2017，52(9): 42-47, 65.
DENG X X, JI C X, HE W Y, et al. Periodic transient level fluctuations in continuous casting mold of slab [J]. Iron & Steel, 2017, 52(9): 42-47, 65.

[26] 黄琦，熊霄，邓小旋，等. 凝固坯壳对高拉速板坯连铸结晶器钢水流动特征的影响[J]. 钢铁，2015，50(1): 37-42.
HUANG Q, XIONG X, DENG X X, et al. Effect of solidified shells on fluid characteristics in high casting speed slab mold[J]. Iron & Steel, 2015, 50(1): 37-42.

[27] SUZUKI M, MIZUKAMI H, KITAGAWA T, et al. Development of a new mold oscillation mode for high-speed continuous casting of steel slabs[J]. ISIJ International, 1991, 31(3): 254-261.

[28] 朱立光，韩毅华，赵俊花. 板坯连铸结晶器保护渣性能的高拉速适用性研究[J]. 特殊钢，2008, 29(4): 1-4, 11-12.
ZHU L G, HAN Y H, ZHAO J H. A Study on applicability of mold flux properties for slab high speed concasting[J]. Special Steel, 2008, 29(4): 1-4, 11-12.

[29] 李宪奎，张德明. 连铸结晶器[M]. 北京：冶金工业出版社，2000.
LI X K, ZHANG D M. Continuous casting mold [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.

[30] 孟祥宁，朱苗勇，刘旭东，等. 高拉速连铸结晶器非正弦振动频率的研究[J]. 铸造技术，2007, 28(4): 523-526.
MENG X N, ZHU M Y, LIU X D, et al. Study on non-sinusoidal oscillation frequency for continuous casting mold with high casting speed[J]. Foundry Technology, 2007, 28(4): 523-526.

[31] 朱苗勇，程乃良，江中块. 高拉速连铸结晶器的非正弦振动振幅[J]. 中国有色金属学报，2007, 17(3): 446-452.
ZHU M Y, CHENG N L JIANG Z K. Non-sinusoidal oscillation amplitude for continuous casting mold with high casting speed[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(3): 446-452.

[32] 吴晓明，李宪奎，王益群，等. 连铸结晶器非正弦振动参数及同步控制模型的研究[J]. 钢铁研究学报，1999, 11(2): 19-23.
WU X M, LI X K, WANG Y Q, et al. Study on the parameters and synchro-control model of the non-sinusoidal oscillation used for continuous casting mold[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999, 11(2): 19-23.

[33] 孟祥宁，朱苗勇，刘旭东，等. 高拉速连铸结晶器非正弦振动因子研究[J]. 金属学报，2007, 43(2): 205-210.
MENG X N, ZHU M Y, LIU X D, et al. Study on non-sinusoidal oscillation factors of continuous casting mold with high casting speed[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(2): 205-210.

[34] 孟祥宁，朱苗勇. 高拉速连铸结晶器非正弦振动同步控制模型[J]. 钢铁研究学报，2007, 19(7): 19-23.
MENG X N, ZHU M Y. Non-sinusoidal oscillation synchro-control model for continuous casting mold at high casting speed[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 19(7): 19-23.

[35] 王水根，冯科，韩志伟，等. 连铸二次冷却控制技术的发展[J]. 工业加热，2012, 41(2): 32-35.
WANG S G, FENG K, HAN Z W, et al. Evolution of secondary cooling control technology for continuous casting[J]. Industrial Heating, 2012, 41(2): 32-35.

[36] 祭程，朱苗勇，谭建平，等. 基于凝固传热模型的轴承钢 GCr15 二冷研究与应用[J]. 中国冶金，2009, 19(8): 1-5.
JI C, ZHU M Y, TIAN J P, et al. Study and application of GCr15 secondary cooling based on solidification and heat transfer model [J]. China Metallurgy, 2009, 19(8): 1-5.

[37] PARFENOV E P, SMIRNOV A A, KOSHKIN A V, et al. Dynamic secondary cooling system for a continuous caster[J]. Metallurgist, 1999, 43: 510-513.

[38] 曹雅林，张炯明，宋炜，等. 高强钢板坯二冷三维动态配水的在线控制[J]. 连铸，2017, 42(4): 26-31.
CAO Y L, ZHANG J M, SONG W, et al. On-line control of three-dimensional dynamic secondary cooling of high-strength steel slab[J]. Continuous Casting, 2017, 42(4): 26-31.

[39] 钟云涛，潘汉玉，JACOBSON N, 等. 板坯结晶器流场控制的发展趋势[J]. 宝钢技术，2016, 188(4): 53-57.
ZHONG Y T, PAN H Y, JACOBSON N, et al. Development trends of mold flow control in slab casting[J]. Baosteel Technology, 2016, 188(4): 53-57.

[40] 邓小旋，潘宏伟，季晨曦，等. 常规低碳钢板坯的高速连铸工艺技术[J]. 钢铁，2019, 54(8): 70-81.
DENG X X, PAN H W, JI C X, et al. Review on high speed conventional slab continuous casting of low carbon steels[J]. Iron & Steel, 2019, 54(8): 70-81.

[41] 黄财德，何文远，刘延强，等. 电磁制动对镀锡板高拉速结晶器内流场的影响[J]. 钢铁，2019, 54(8): 90-101.
HUANG C D, HE W Y, LIU Y Q, et al. Effect of electromagnetic braking on flow field in tinplate under high casting speed[J]. Iron and Steel, 2019, 54(8): 90-101.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net