

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20190082

常规低碳钢板坯的高速连铸工艺技术

邓小旋^{1,2}, 潘宏伟^{1,2}, 季晨曦^{1,2}, 初仁生^{1,2}, 刘清梅^{1,2}, 朱国森^{1,2}

(1. 首钢集团有限公司技术研究院, 北京 100043; 2. 绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室, 北京 100043)

摘 要: 高速连铸具有显著减少建设投资、大幅提高产量和降低物料消耗等优势。但欧、美及国内多数钢厂均使用中低拉速连铸常规厚度板坯, 主要原因是高速连铸拉漏风险增加与卷渣导致的表面质量恶化。为解决上述问题, 以日本 JFE 为代表的钢企开发了一系列关键技术, JFE 福山 No. 5 铸机连铸厚度 220 mm 低碳钢板坯最大拉速达到 3.0 m/min。阐述了国内外常规板坯铸机的高速连铸发展历程。基于 JFE 福山 No. 5 CCM 和首钢京唐 No. 3 CCM 低碳钢高速连铸实践, 综述了高速连铸的 3 项关键技术, 分别是强冷却能力结晶器技术、高速连铸结晶器卷渣控制技术和电磁冶金技术, 为生产冷轧薄板钢种为主的钢厂提高铸机拉速提供参考。

关键词: 高速连铸; 常规板坯; 低碳钢; 结晶器; 卷渣

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)08-0070-12

Review on high speed conventional slab continuous casting of low carbon steels

DENG Xiao-xuan^{1,2}, PAN Hong-wei^{1,2}, JI Chen-xi^{1,2}, CHU Ren-sheng^{1,2},
LIU Qing-mei^{1,2}, ZHU Guo-sen^{1,2}

(1. Research Institute of Technology, Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100043, China; 2. Beijing Key Laboratory of Green Recyclable Process for Iron and Steel Production Technology, Beijing 100043, China)

Abstract: Many conventional slab casters in Europe, America and domestic steel companies do not use the high-speed casting although it can significantly reduce the equipment investment, improve the productivity and lower the refractory consumption. The main reasons are the increasing risk of the sticking breakout and the deterioration of surface quality due to the mold powder entrapments at high-speed casting. To solve these problems, Japanese steel companies (eg. JFE) developed a series of key technologies for high-speed casting and the maximum speed of 220 mm-thickness low carbon steel slabs for No. 5 CCM at JFE Fukuyama works reached 3.0 m/min. The transitions of casting speeds for overseas and domestic slab casters were presented. In addition, three key technologies (strong primary cooling technology, control of mold powder entrapments and application of electromagnetic equipment at high-speed casting) were reviewed based on the high-speed casting practices for No. 5 CCM at JFE Fukuyama Works and No. 3 CCM at Shougang Jingtang Works. This review can guide the steel plants to improve their casting speeds whose products are mainly composed of cold-rolled sheets.

Key words: high speed casting; conventional slab; low carbon steel; mold; mold powder entrapment

连铸技术的提出、开发与应用是继转炉炼钢之后的又一革命性炼钢技术,它极大地提高了金属产量,减少了能源消耗。尽管受到薄板坯连铸(CSP、FTSC)和薄带连铸的挑战,常规厚度板坯连铸(220~250 mm)由于压缩比大、生产质量稳定,依然是生产优质板材尤其是高品质冷轧钢板的重要手段。由于拉速是板坯厚度的函数,本文将厚度不低于 220 mm、拉速不低于 2.0 m/min 定义为常规厚度板坯的高速连铸。在满足产品质量的条件下,提

高铸机拉速意味着提产增效。高速连铸是一项综合性技术,它需要炼钢、精炼、连铸与轧制等道工序密切配合,互相协作。其优势主要表现在:减少建设投资、设备损耗与人力成本;提高产量,降低成本;减少转炉、钢包与中间包耐火材料消耗,降低转炉出钢温度;减少钢/渣/耐火材料反应时间,提高钢水洁净度。由于碳含量对钢凝固特性影响很大,高速连铸技术集中应用在低碳钢与中碳亚包晶钢,本文仅讨论低碳钢(主要用于冷轧薄板)的高速连铸技

术。从世界范围来看,采用 2.0 m/min 及以上拉速稳定连铸厚度不低于 220 mm 板坯的铸机主要在日本,包括 JFE 福山 No. 5、No. 7 铸机,JFE 仓敷 No. 4 铸机,JFE 千叶 No. 3 铸机,新日铁住金名古屋 No. 2、鹿岛 No. 3 铸机和神户加古川 No. 4 铸机。

1 低碳钢板坯高速连铸的难点及相关控制技术分析

尽管高速连铸技术具有前文所述的显著优点和效益,但日本新日铁多数钢厂、美、欧及中国多数钢厂均使用中低拉速连铸常规低碳钢板坯,主要原因在于:(1)铸机冶金长度小、前道工序钢水处理时间长,节奏等因素制约;(2)拉速提高,保护渣消耗量减少,坯壳与铜板之间润滑变差,黏结漏钢风险加大;(3)高速连铸结晶器凝固坯壳变薄,坯壳强度下降,增大漏钢风险;(4)高速连铸结晶器液面波动与表面流速更剧烈,更易卷渣引起轧板线状缺陷;(5)拉速提高,结晶器内夹杂物停留时间缩短,导致其去除率降低,轧板出现缺陷风险增大;(6)在相同条件下,提高拉速延长凝固时间、增大鼓肚量,中心偏析和内部裂纹发生率提高。但需要说明的是,用于冷轧薄板的低碳钢由于压缩比大、钢塑性好,中心偏析等内部质量不是限制拉速提高的主要因素。

为解决上述难题,研究人员开发了高速连铸的多项关键技术,包括:(1)强冷却能力结晶器技术;(2)高速连铸漏钢预报技术;(3)高速连铸保护渣技术;(4)高速连铸结晶器流场控制技术(含电磁冶金技术);(5)非正弦振动技术;(6)二冷动态控制技术;(7)低过热度浇铸技术等。1995 年王新华等^[1]系统综述了日本高速连铸的 5 项关键技术(2)~(6)。1996 年赵兴武等^[2]重点论述了技术(3)~(7)。1997 年张洪波等^[3-4]综述了高速连铸的 3 项关键技术,包括技术(1)、(3)和(5)。2007 年宝钢蔡宁^[5]综述了高速连铸的技术(1)和(3)~(5)。

2003 年攀钢从达涅利引入国内第一台板坯高速连铸机,随后梅钢、宝钢、马钢、邯钢、首钢均引入了常规板坯高速铸机,并对高速连铸工艺开展了一系列研发工作。前人详细论述了非正弦振动^[4,6-7]和高速连铸保护渣技术^[8-10],本文以 JFE 福山 No. 5 CCM 和首钢京唐 No. 3 CCM 高速实践为背景,综述了国内外高速连铸技术的发展历程并重点论述了高速连铸的 3 项关键技术,即强冷却能力结晶器技术、高速连铸卷渣控制技术与电磁冶金技术。为生产冷轧薄板钢种为主的钢厂提高铸机拉速提

供参考。

2 常规厚度板坯高速连铸发展历程

2.1 国外高速连铸发展历程

常规板坯的高速连铸发源于日本。为推行热装轧制和直接轧制,保证连铸与热轧匹配,日本钢企板坯铸机在 20 世纪 80 年代中期大幅度提高拉速(图 1)^[11]。如 JFE 福山 No. 5 CCM 连铸厚度 220 mm 板坯拉速从 1.6 提高至 2.8 m/min,最高达 3.0 m/min,号称“冠军铸机”。JFE 千叶 No. 3 CCM、新日铁住金鹿岛 No. 3 CCM、神户加古川 No. 4 CCM 的拉速从常规提高至 2.0 m/min 以上。部分高速板坯铸机的主要参数见表 1,它们具有以下特点:(1)为保证出扇形段铸坯完全凝固,铸机长度均大于 40 m;(2)为保证高速连浇过程缓冲和夹杂物充分上浮,配备大容量中间包(60~90 t);(3)为保证结晶器的强冷却能力,结晶器长度范围为 900~950 mm。

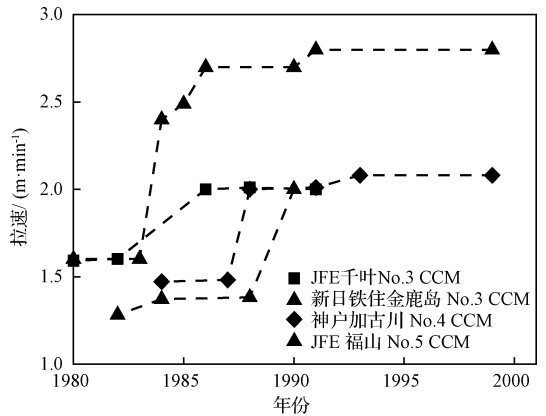


图 1 日本主要高速铸机拉速提高历程

Fig. 1 Transition of casting speed of high-speed casters in Japanese steel mills

除日本外,韩国、加拿大等地的板坯铸机也开展了提速试验。2007 年,浦项光阳 No. 2-3 CCM 由弧形改造成直弧形^[12],改造后铸坯厚度从 230 增至 250 mm,结晶器长度由 900 延长至 950 mm,弧半径由 12 降至 9 m,冶金长度由 41 延长至 47 m;改造后为达到每年 350 万 t 汽车外板的目标,拉速从 2.3 提升至 2.5 m/min。加拿大 Dofasco 报道^[13],为把年产量从 140 万 t 增至 170 万 t,其 No. 2 铸机试验拉速从 1.7 提高至 2.0 m/min。

2.2 国内高速连铸发展历程

国内在 2003 年前建成的常规板坯铸机拉速为 1.1~1.8 m/min^[14],2003 年之后新建的几台常规板坯铸机多采用高拉速设计。

表 1 国外高速连铸机参数汇总

Table 1 Summary of specifications of oversea high speed conventional slab casters

项目	企业名称									
	日本 JFE				日本新日铁住金		日本神户	韩国浦项		
铸机名	福山 No. 5	福山 No. 7	仓敷 No. 4	千叶 No. 3	名古屋 No. 2	鹿岛 No. 3	加古川 No. 4	光阳 No. 2-3	光阳 No. 2-4	浦项 No. 3-3
机型	V-B	V-B	V-B	V-B	V-B	V-B	V-B	V-B	V-B	V-B
铸流数	2	1	2	2	2	2	1	2	2	2
中间包容量/t	80	80	70	—	60	65	80	80	70	80
结晶器长/mm	950	950	900	900	900	900	900	950	—	900
铸坯厚度/mm	220	235,260	220	260	245	220	230,280	250	250	250
铸坯宽度/mm	700~1 650	750~2 100	850~1 900	800~1 800	900~1 630	700~1 600	900~1 800	Max. 1 600	820~2 000	740~1 650
铸机长度/m	42.1	44.7	45.0	—	48.4	42.7	40.5	47.0	41.0	43.1
最大拉速/ (m·min ⁻¹)	3.0	2.6	2.5	2.0	2.0	2.5	2.0	2.7	2.2	2.1
参考文献	[15]	[16]	[11]	[17]	[18]	[11]	[11]	[12]	[19]	[19]

2003 年,攀钢在 No. 1 双流板坯铸机基础上引进了达涅利的 No. 2 单流板坯铸机,并对高速连铸技术开展了较多研究^[20-22]。通过工艺改进,连铸厚度 200 mm 板坯拉速提高至 1.8 m/min,最高达 2.0 m/min。据报道,攀钢高速连铸 LCAK 钢铸坯表面无清理率达 90% 以上,铸坯 $\omega(\text{T}[\text{O}])$ 控制在 0.002 0% 以下。攀钢应用高速连铸技术后提高了生产能力,相当于新建 1 台铸机,减少建设投资 3 亿~4 亿元^[23]。同年,梅钢 No. 2 单流铸机投产,该铸机配备 FC-mold,设计最大拉速为 2.4 m/min,但 2008 年增流改造后逐渐降为常规拉速^[24]。

2006 年宝钢 No. 4 铸机投产,主要为 1 880 mm 轧机供应铸坯。产品覆盖超低碳钢、低合金结构钢等 5 大品种,最高设计拉速为 2.2 m/min。设备采用小辊密排、分节辊布置等先进技术减少鼓肚,但其实际报道拉速低于 2.2 m/min^[25]。2007 年,马钢新区四钢轧总厂投产,其设计产能为 150 万 t 冷轧基料。四钢轧 No. 1 铸机配备钢包下渣检测装备、漏钢检测系统、铸坯洁净度判定系统与 FC-mold^[26],但其实际仍采用常规拉速,2018 年马钢报道其优化了高速连铸浸入式水口结构、FC-mold 上下线圈电流等工艺参数,断面不超过 1 200 mm 拉速提高至 1.7 m/min 以上^[27]。2008 年 10 月,邯宝炼钢厂 2 台板坯连铸机投产,其 No. 1 铸机设计拉速为 2.03 m/min,配备在线调宽、动态轻压下与 FC-mold^[28]。2010 年以前由于受生产节奏影响,拉速低于 1.2 m/min,2010 年 11 月,拉速提高至 1.5 m/min,

但仍低于设计拉速。

2009 年,首钢京唐钢铁联合有限责任公司(以下简称首钢京唐)投产。立足建立新一代高效、低成本洁净钢平台,首钢京唐采用了一系列新技术。如炼钢采用“全三脱”工艺,RH 设计为 5 级蒸汽泵,67 Pa 抽气能力达 1 250 kg/h;板坯设计成高速连铸,No. 3 铸机设计最大拉速为 2.3 m/min;配备了多项板坯铸机的先进技术,如液位自动控制、结晶器在线调宽、漏钢检测与预报、动态轻压下与铸坯跟踪等^[29]。2012 年,首钢京唐与北京科技大学王新华教授课题组合作,对高速连铸结晶器内钢水流动^[30-36]、铜板传热行为^[37-38]、铸坯润滑行为^[38-39]和铸坯表层大尺寸夹杂物表征与控制^[32, 40-42]开展了系统研究。连铸厚度 237 mm 低碳钢的拉速从 1.6 提高至 2.5 m/min,突破了设计最大拉速。2018 年,首钢京唐详细研究了 RH 高效精炼工艺技术(SVDC, Shougang developed Vacuum Decarburization)和高速连铸稳定化技术,目前京唐 No. 3 铸机浇铸断面不超过 1 200 mm 的 LCAK 板坯拉速稳定控制在 1.8~2.0 m/min。

国内板坯高速铸机的主要参数见表 2,分析认为,它们具有 2 个共同特点:(1)铸机长度大,除攀钢、邯宝外均大于 40 m,设计拉速均不低于 2.0 m/min;(2)为保证液面稳定控制,均配备有电磁制动设备(FC-mold)。尽管设计拉速均大于 2.0 m/min,但大规模应用中,除首钢京唐 No. 3 CCM 外,其他铸机拉速均小于 2.0 m/min。

表 2 国内高速连铸机的主要参数

Table 2 Summary of specifications of high speed conventional slab casters in China

项目	攀钢 No. 2 CCM	梅钢 No. 2 CCM	宝钢 No. 4 CCM	邯宝 No. 1 CCM	首钢京唐 No. 3 CCM	马钢四钢轧 No. 1 CCM
机型	直弧形(单流)	直弧形(单流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)	直弧形(双流)
供应商	达涅利	奥钢联	达涅利	达涅利	达涅利	西马克-德马格
弧形半径/m	8.0	8.0	9.5	9.5	9.5	9.5
结晶器长度/mm	900	900	900	900	900	900
钢包容量/t	120	150	250	250	300	300
铸机长度/m	30.3	41.3	41.4	39.3	43.5	42.6
铸坯厚度/mm	200	210,230	230	230,250	237	230
铸坯宽度/mm	900~1 350	900~1 320	900~1 750	900~2 150	900~1 650	950~2 150
电磁设备	—	FC-mold	FC-mold	FC-mold	FC-mold	FC-mold
设计拉速/(m·min ⁻¹)	2.50	2.40	2.20	2.03	2.30	2.20
参考文献	[43]	[24]	[25]	[44]	[45]	[26]

3 板坯高速连铸关键技术

3.1 强冷却能力结晶器技术

从水口吐出的钢液在结晶器内凝固,形成具有一定厚度的初生坯壳以抵抗钢水静压力而不发生漏钢。高速连铸条件下凝固坯壳变薄,因此必须采用强冷结晶器技术增加初生坯壳厚度。

JFE 福山 No. 5 CCM 报道^[5]其采用强冷结晶器技术的要点为:(1)控制结晶器铜板厚度;(2)合理调整固定螺栓处冷却;(3)增大冷却水流量和流速。采用强冷结晶器等技术后,以拉速 3.0 m/min 连铸厚度 220 mm 铸坯的铜板热面最高温度小于 350 ℃,有效防止了坯壳与铜板黏结。此外,拉速为 3.0 m/min 条件下出结晶器坯壳厚度为 9.1 mm^[15],但未发生漏钢事故。

首钢京唐 No. 3 CCM 为保证结晶器冷却水流速大于 9 m/s,将宽面冷却水量从 4 610 提高至 4 900 L/min,窄面从 490 提高至 600 L/min^[29]。采用二维凝固传热模型计算得到出结晶器的凝固坯壳厚度,结果如图 2 所示^[46]。可以看出,坯壳厚度随拉速增大而减小,拉速 2.5 m/min 对应的窄面出结晶器坯壳厚度为 9.5 mm,与 JFE 福山 No. 5 CCM 报道的坯壳厚度相当。京唐 2.5 m/min 拉速浇铸没有发生漏钢事故。此外,首钢京唐低碳钢高速连铸实践中,拉速提高至 1.7 m/min 后冷却水温差达 12 ℃,造成镀层频繁脱落。将水箱进水孔直径从 60 扩大至 80 mm,水温差从 12 降至 8 ℃,解决了镀层脱落问题^[29]。

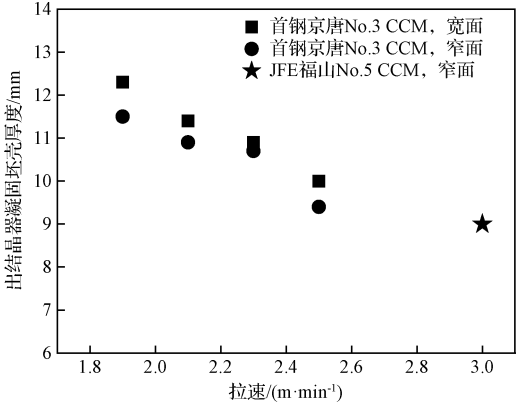


图 2 计算得到拉速与出结晶器坯壳厚度的关系

Fig. 2 Effect of casting speed oncalculated shell thickness exiting mold

3.2 高速连铸卷渣控制技术

3.2.1 结晶器卷渣发生机理

日本学者采用物理模拟详细研究了结晶器卷渣机理,其中以 Yoshida J 等^[47-48]与 Watanabe J 等^[49]的研究结果最具代表性。卷渣主要有 5 种方式:(1)流股撞击窄面沿着窄面往上运行,推动保护渣往水口附近移动,导致剪切卷渣;(2)水口左右两侧非对称流场导致水口附近产生漩涡卷渣;(3)吹入结晶器的氩气泡在钢/渣界面破裂,将保护渣裹挟进钢液;(4)钢液表面非稳态流引起的非稳态卷渣^[50];(5)水口出口高速钢流形成的负压区^[47]将液态保护渣沿水口外壁吸入,引起卷渣。日本研究的关于卷渣机理及其结论见表 3。国内研究人员利用水模型、数值模拟研究了保护渣卷入位置、卷入方式、卷入深度

以及工艺参数对卷渣的影响,其主要结论、试验方法 剪切卷渣,较少报道气泡卷渣、非稳态卷渣与水口负
等信息见表 4。可以看到,国内研究集中在漩涡与 压卷渣。

表 3 日本学者关于卷渣机理的研究及其结论

Table 3 Partial summary ofmechanism of mold powder entrapments and conclusions from Japanese researchers				
卷渣机理	研究者	临界条件及结论	试验方法	文献
(1)剪切卷渣	Imamura A, et al	不卷渣表面流速<0.15m/s	水模型和工业试验	[51]
	Kasai N, et al	$v_s < \left[2 \sqrt{12(\rho - \rho_p) \cdot g \cdot \sigma_s / \rho_p} - 2gh \right]^{1/2}$ 式中: v_s 为表面流速, ρ 、 ρ_p 分别为钢液和保护渣密度,kg/m ³ ; h 为液面波动值,m; σ_s 为表面张力,N/m; g 为重力加速度,m/s ²	水/硅油模型	[52]
	Tozawa K, et al	$v_s < \left[\frac{128g(\rho - \rho_p)\sigma_s \cos\theta}{3\rho^2} \right]^{1/4}$ 式中: v_s 为表面流速,m/s; ρ 、 ρ_p 分别为钢液和保护渣密度,kg/m ³ ; σ_s 为表面张力,N/m; θ 为角度,(°); g 为重力加速度,m/s ²	水/硅油模型	[53]
	Teshima T, et al	F 数范围:1.7< F <3.0(F 数定义见下文)	水模型与工业试验	[54]
(2)漩涡卷渣	Tanaka H, et al	得到漩涡穿透深度	水/硅油模型	[55]
	Yamaoka M, et al	不卷渣条件: $v_s + 2.14u_d < 15$ 式中: v_s 为表面流速,m/s; u_d 为钢液向下速度,m/s	水/聚乙烯粒子模型	[11]
(3)气泡卷渣	Yamashita S, et al	硅油穿透水的深度约等于气泡直径的 3 倍	水/硅油模型	[56]
(4)非稳态卷渣	Iguchi M, et al	结晶器液面的 Kelvin-Helmholtz 失稳,导致保护渣卷入	盐水/硅油模型	[50]
(5)负压卷渣	Yoshida J, et al	非稳态流场导致水口附近负压产生,水口堵塞程度越大,负压越大	盐水/硅油模型	[47]

表 4 国内关于卷渣研究的部分结果

Table 4 Partial summary on research results of mold powder entrapments in China				
卷渣机理	研究者	临界条件及结论	试验方法	文献
剪切卷渣	雷洪,等	不发生卷渣流速<0.115~0.119 m/s	1:0.33 水模型	[57]
	雷洪,等	$v_s = \left[1 + C \left(\frac{\rho_p}{\rho} \right) 2/3 \left(\frac{v_p}{v} \right)^{1/3} \right] \cdot \left[\frac{36(\rho - \rho_p)g\sigma_s}{\rho_p^2} \right]^{1/4}$ 式中: v_s 为临界表面流速; C 为系数; ρ 、 ρ_p 分别为钢液和保护渣密度,kg/m ³ ; σ_s 为表面张力,N/m; v 、 v_p 分别为钢液和保护渣的运动黏度,m ² /s; g 为重力加速度,m/s ²	数值模拟	[58]
	齐新霞,等	提出了卷渣指数 $J = v \times h / (t \times H)$ 式中: J 为卷渣指数; v 为拉速; h 为 1/10 大波值; t 为开始卷渣时间; H 为水口浸入深度	1:0.6 水模型	[59]
	陆巧彤,等	提出利用数值模拟计算 F 数	数值模拟	[60]
	王现辉,等	提出了结晶器内周期性卷渣特征	1:1 水模型	[61]
	张宁,等	确定了液面发生卷渣时的波动情况	1:0.25 水模型	[62]
漩涡卷渣	包燕平,等	分析了各个工艺参数对结晶器液面保护渣的卷入位置、 卷入方式与卷入深度的影响	1:1 水模型	[63]
	陈芝会	研究了水口几何形状、浸入深度和拉速对漩涡卷渣的影响	1:0.25 水模型	[64]
	孙彦辉,等	宽度不同位置的卷渣机理不一致。水口周围有漩涡卷渣和液面扰动卷渣	1:1 水模型	[65]
气泡卷渣	张胜军,等	大尺寸气泡对渣层的混卷是卷渣的主要方式,漩涡卷渣其次	1:0.4 水模型	[66]

日本学者 Teshima T^[54]以 JFE 福山 No.5 高速
铸机为背景,采用 1:3 的水模型和工业试验研究了
板坯高速连铸结晶器内钢水流动行为,提出用液面
波动指数“ F 数”来评价液面波动,作者研究了 F 数
与冷轧卷缺陷发生率的关系,认为 F 数控制在 1.7~3.0 时,冷轧卷表面缺陷发生率最低。 F 数计
算公式见式(1)。

$$F = \frac{\rho Q_L v_e (1 - \sin\alpha)}{4D} \tag{1}$$

式中: ρ 为钢液密度,kg/m³; Q_L 为钢液体积流量,

m^3/s ; v_c 为钢液流股撞击结晶器窄面速度, m/s ; α 为钢液流股撞击窄边的角度, ($^\circ$); D 为流股撞击点距弯月面的距离, m 。

尽管提出了 F 数, 但其仍是一个评价卷渣的间接指标。在高速连铸实践中, 主要以液面波动和表面流速来评价。Tsai H T 等^[67] 提出液面波动控制在 $\pm 3\text{ mm}$ 以下时缺陷发生率低, 卷渣发生的临界表面流速争议较大, 不同学者利用水模型得到的临界表面流速见表 3。高速连铸实践中, 控制液面波动和表面流速较直接的方法是优化浸入式水口结构 and 应用电磁冶金技术。

3.2.2 高速连铸浸入式水口研究

浸入式水口结构是连铸过程中为数不多的较易改变且对结晶器流场产生深远影响的参数^[68]。浸入式水口结构主要包括水口出口孔数(双孔或多孔)、出口角度、底部形状、出口形状。常规厚度板坯连铸目前主流是采用双孔水口。文献报道常规板坯高速连铸浸入式水口有如下特点:

(1) 使用大倾角水口有利于降低高速连铸结晶器的液面波动和卷渣风险。曹娜等^[69] 利用 1:0.4 水模型研究了梅钢板坯厚度 220 mm 的高速连铸(最大 2.2 m/min)结晶器钢/渣界面行为, 认为水口倾角从 10° 提高至 20° , 弯月面处液面波动从 13.7 降至 6.2 mm。邓小旋^[32] 和 LI L 等^[37] 利用 1:1 水模型和数值模拟研究了首钢京唐 No. 3 CCM 高速连铸(最大 2.5 m/min)结晶器液面波动和表面流速, 认为水口角度从 15° 提高至 20° 可有效降低液面波动, 并成功应用于高速连铸工业实践。Teshima T 等^[54] 报道 JFE 福山 No. 5 CCM 在高速连铸(拉速为 1.9 m/min, 宽度为 1 600 mm)使用倾角为 45° 浸入式水口, 认为使用大倾角水口有助于将高速连铸的“ F 数”控制在合理范围, 减少冷轧板缺陷发生率。

(2) 凹底水口有利于降低液面波动和卷渣概率。文献[31]利用 1:1 水模型和工业试验研究了首钢京唐 No. 3 CCM 高速连铸下凹底、凸底和平底对液面特征的影响。水模型结果显示, 凹底和平底水口的流场对称性优于凸底。水模型和工业试验都表明, 凸底水口的液面波动和表面流速均明显大于凹底。因此从减少卷渣角度推荐高速连铸使用凹底水口。文献[30]报道了高速连铸条件下使用 5 种不同底部形状水口出口流股特征, 认为凸底水口出口流股动能大, 湍动能小, 但凹底水口由于与水口底部作用, 动能变弱但湍动能大, 有利于消除水口出口的负流区, 缓解水口堵塞。

(3) 水口出口形状没有统一的认识。熊霄等^[70] 利用 1:1 水模型对首钢京唐 No. 3 CCM 高速连铸的研究表明, 椭圆状水口在高速连铸时流股扩展角和倾角最大, 在出口处流速分布均匀, 推荐在高速连铸使用。Bai H 等^[71] 认为方形出口流股流速与负流区最大, 矩形出口是较优的出口形状。

3.3 高速连铸结晶器电磁冶金技术

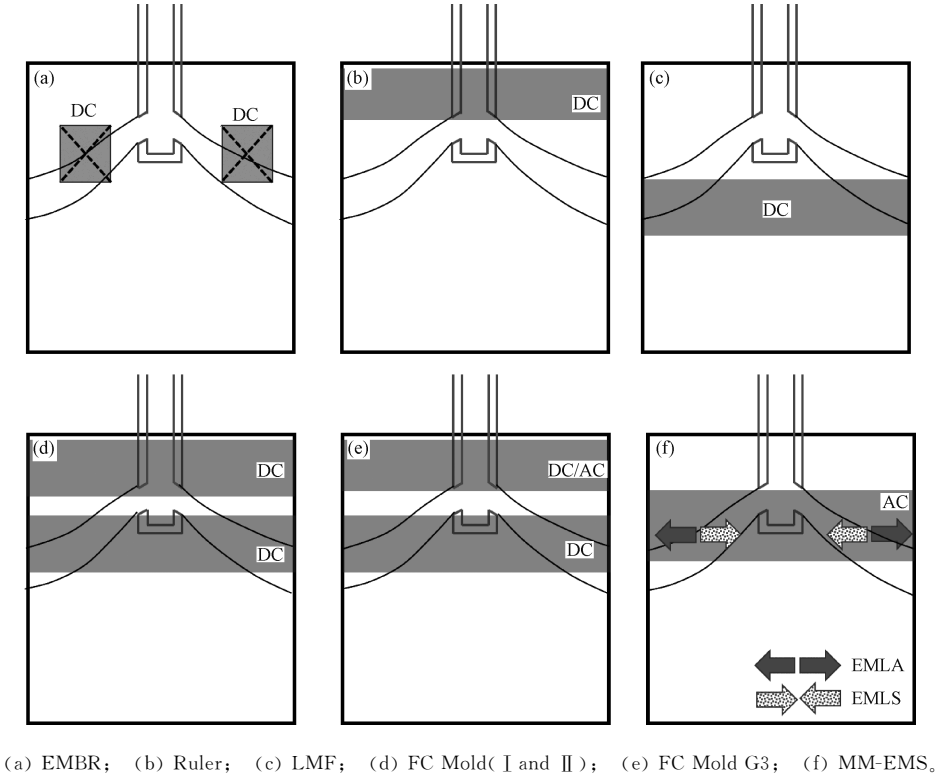
应用于常规板坯高速连铸的电磁设备主要包括 ABB 公司的电磁制动(EMBR, Ruler 和 FC Mold) 和 JFE/达涅利 Rotelec 开发的 MM-EMS。高速连铸电磁设备示意图如图 3 所示。

1982 年, ASEA(今 ABB) 和川崎(今 JFE) 联合开发了第一代局部区域电磁制动技术(Local EMBR)^[72], 其示意图如图 3(a) 所示。该设备特点是在 2 个水口出口区域添加一垂直于流股方向的恒稳磁场, 控制从浸入式水口吐出的钢液流股, 减轻其对窄边的冲击力度, 抑制表面流速和液面波动, 降低卷渣概率。川崎水岛厂^[73] 报道, 采用 EMBR 后, 浇铸 220 mm 铸坯从结晶器 SEN 侧孔吐出的射流速度降低了 50%。1992 年, Hoogovens 与 ABB 公司成功开发第二代全幅一段(EMBR-Ruler)技术^[74], 它的特点是安装在靠近弯月面位置, 可在全宽度方向上控制结晶器钢水流动(图 3(b))。在 Hoogovens 公司的 CC22 连铸机上开展试验, 结果表明, 使用该设备后射流冲击深度从 4 降至 1 m, 弯月面温度提高 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 液面波动从 5 降至 3 mm, 表面流速从 0.30 降至 0.15 m/s 以下, 凝固坯壳厚度增加 3 mm, 允许拉速进一步提高 0.2 m/min。1992 年, 新日铁^[75-76] 开发了 LMF(Level Magnetic Field, 图 3(c)), 该装备与 Ruler 不同之处在于其安装在水口出口下部, 抑制钢液流股对坯壳的冲击, 减小下回流冲击深度, 在下部形成所谓的“活塞流”。该活塞流动有利于非金属夹杂物和气泡上浮, 可有效改善板坯表面质量。Ruler 和 LMF 尽管报道取得了较好的效果, 但其制动效果受设备安装位置和浇铸参数影响较大, 较少应用于常规板坯的高速连铸。

1992 年, 川崎公司开发了全幅二段电磁制动技术(FC Mold)^[77]。该设备特点是由 2 个覆盖整个宽度方向的水平静磁场构成。FC Mold 根据其发展历程分为 FC Mold I 和 II(图 3(d))。FC Mold I 的特点是上下线圈由同一直流电源控制, 不能分开调节磁场强度。FC Mold II 的上下线圈由不同电源控制, 可独立调节。JFE 千叶 No. 3 CCM^[17] 使用 FC Mold 高速连铸生产超低碳钢。其报道使用

FC Mold后结晶器弯月面温度从 1 540 提高至 1 545 ℃,液面波动大幅度降低,表面缺陷指数从 4.5 % 下降至 0.3 %。首钢京唐 No. 3 CCM 在高速浇铸(2.5 m/min)时,使用 FC Mold II 能将结晶器液面波动控制在±3 mm,为提高拉速、保证轧板表面质量奠定了基础^[32, 78]。此外,首钢京唐 No. 3 CCM 报道^[79],FC Mold II 不仅用在高速连铸(≥1.8 m/min),在常规拉速范围(1.5~1.7 m/min)仍可使用。在拉速 1.7 m/min 条件下,使用 FC Mold II 可将弯月面铜板温度从 144 提高至 175 ℃,钩状坯壳平均深度从 2.3 降至 1.7 mm。焦兴利等^[80]研究了马钢四钢轧 No. 1 CCM 浇铸 IF 钢使用 FC Mold II

的最佳参数,认为该装备上下线圈电流分别为 +240 A 和 -274 A 时,IF 钢板夹杂物发生率从初期的 1.1 % 下降至 0.35 %。2013 年,ABB 公布了其新一代电磁制动设备 FC Mold G3^[81],它在第二代(FC Mold II)基础上在上磁场附加了交流磁场(图 3(e)),可提供 3 种模式,即直流、交流和组合模式。直流模式:上下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,在低拉速使用,在弯月面形成旋转流场冲刷凝固前沿夹杂物,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。



(a) EMBR; (b) Ruler; (c) LMF; (d) FC Mold(I and II); (e) FC Mold G3; (f) MM-EMS。

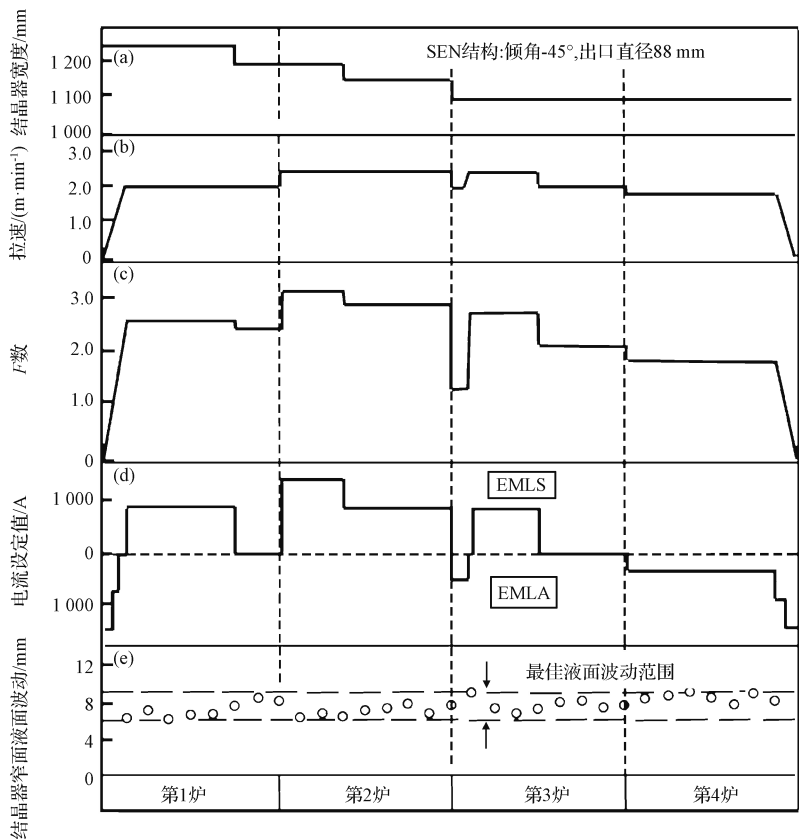
图 3 高速连铸电磁设备示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electromagnetic devices for high speed conventional slab casting

MM-EMS 的前身为 NKK(今 JFE)开发的 EMLA-EMLS(Electro Magnetic Level Accelerator + Electro-Magnetic Level Stabilizer)技术。该装置在结晶器高度中部设置了 4 个电磁发生器,采用交流电源生成 4 个变化的电磁场(图 3(f))。当浇铸速率较低时(较低拉速或窄断面连铸),钢水上回流弱,向弯月面供热不足,容易造成“钩状”坯壳发达,保护渣卷入或气孔等缺陷增多,采用 EMLA 加速钢水流。反之,在浇铸速率高时(高速或宽断面连铸),钢水流到达窄边附近后形成的上回流过强,容易引起

保护渣卷入等问题,此时可采用 EMLS 对钢水流制动减速。JFE 福山 No. 5 CCM 高速连铸采用 EMLA-EMLS 在拉速和断面变化时的操作情况如图 4 所示。该厂根据“F 数”大小来确定采用 EMLA 或 EMLS^[82]。

基于 EMLA-EMLS 技术,JFE 联合 Rotelec 公司在 2003 年法国里昂召开的电磁会议上提出了一种自动在线控制系统,称为多模式电磁搅拌器(MM-EMS,即 Multi-Mode EMS)。它的开发基于对钢液流场形态控制理念的发展。结晶器内流场形



(a) 结晶器宽度； (b) 拉速； (c) F 数； (d) 电流设定值； (e) 结晶器窄面液面波动。

图 4 JFE 福山 No. 5 CCM 使用 EMLA+EMLS 操作情况

Fig. 4 Operation mode for EMLA+EMLS of No. 5 CCM in JFE Fukuyama Works

态主要分单股流、双股流和不稳定瞬态流。研究表明,结晶器内强度适中的双股流为最优流态^[83]。该设备具备 3 种电磁冶金功能:(1) EMLA;(2) EMLS;(3) EMRS。前 2 种功能与 EMLA+EMLS 相同: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 种功能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。韩国浦项公司从 2001 年起对板坯铸机进行改造,在其 4 台板坯铸机上均配备了 MM-EMS。此外,据浦项报道,安装在结晶器中部的 MM-EMS 在使用其搅拌功能时会与主流股产生干扰。因此,浦项创新开发了可移动的 MM-EMS;在使用搅拌功能时将电磁设备移动至弯月面,在使用加速或减速功能时恢复至结晶器中部位置^[12]。由于采用了 MM-EMS 装备等关键技术,浦项光阳 No. 2-3 铸机浇铸 250 mm 厚度 LCAK 钢拉速提高至 2.7 m/min。

从前文论述可知,高速连铸电磁制动设备均朝

着“多模式”、“多功能”发展。电流从单纯的“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”。ABB 公司的 FC Mold G3 和 Rotelec 公司的 MM-EMS 是常规板坯结晶器电磁制动设备的典型代表。高速铸机配备的电磁设备见表 5。

4 板坯高拉速连铸发展展望

随着中国经济进入发展转型期,钢铁工业将会面临巨大挑战^[84],主要体现在:企业竞争日趋激烈、降低生产成本压力日益增加、环保限产日益严格。随着高速连铸漏钢预报系统和保护渣技术的进一步发展,高速连铸技术应会成为高品质冷轧薄板生产企业降本增效的有效手段。

(1)高速连铸卷渣最直接控制参数是液面波动和表面速度,大倾角和凹底浸入式水口是高速连铸降低液面波动和卷渣的有效手段。

(2)高速连铸电磁制动设备均朝着“多模式”、“多功能”发展。电流从单纯的“直流、交流”发展成

表 5 高速铸机配备的电磁设备
Table 5 Electromagnetic equipment for high speed casters

公司	连铸机	FC Mold	EMBR	MM-EMS	参考文献
JFE	千叶 No. 3	✓			[77]
	福山 No. 5&7			✓ (EMLA-EMLS)	[82]
	仓敷 No. 4	✓			[85]
新日铁住金	鹿岛 No. 3		✓		[86]
POSCO	浦项 No. 2-1			✓	[18]
	浦项 No. 3-3			✓	[18]
	光阳 No. 2-3			✓	[12]
	光阳 No. 2-4			✓	[18]
首钢	京唐 No. 3	✓			[37]
马钢	四钢轧 No. 1	✓			[80]
宝钢	宝山 No. 4	✓			[25]
邯钢	邯宝 No. 1	✓			[28]

“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”。ABB 公司的 FC Mold G3 和 Rotelec 公司的 MM-EMS 是常规板坯结晶器电磁制动设备的典型代表。

(3) 尽管以首钢京唐 No. 3 CCM 为代表的常规板坯铸机的拉速取得突破，但高速连铸稳定化技术依然是今后的研发重点。

(4) 国内常规板坯高速连铸技术的研究主要集中在低碳、超低碳钢等冷轧钢种。亚包晶钢的拉速与日本依然差距较大。亚包晶钢的高速连铸工艺技术将是今后的研发方向。

参考文献：

[1] 王新华, 赵沛, 周荣章. 高速连铸的几项关键技术[J]. 炼钢, 1995, 11(4): 21. (WANG Xin-hua, ZHAO Pei, ZHOU Rong-zhang. Key technologies to the high speed continuous casting process[J]. Steelmaking, 1995, 11(4): 21.)

[2] 赵兴武. 国外板坯高速连铸技术[J]. 钢铁钒钛, 1996, 17(2): 42. (ZHAO Xing-wu. A review from the world-wide perspective on high speed slab continuous casting technology[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 1996, 17(2): 42.)

[3] 张洪波. 高速连铸的基本工艺条件[J]. 炼钢, 1995, 30(1): 32. (ZHANG Hong-bo. Basic process conditons for high speed concasting[J]. Steelmaking, 1995, 30(1): 32.)

[4] 张洪波. 实现高速连铸的三项关键技术[J]. 钢铁, 1997, 32(3): 25. (ZHANG Hong-bo. Three key techniques for realizing high speed continuous casting[J]. Iron and Steel, 1997, 32(3): 25.)

[5] 蔡宁, 杜锋. 提高板坯连铸拉速的技术措施[J]. 炼钢, 2007, 23(5): 58. (CAI Ning, DU Feng. Technological measures for increaseing the speed in slab continuous casting[J]. Steel-

making, 2007, 23(5): 58.)

[6] 孟祥宁, 朱苗勇. 高拉速连铸结晶器非正弦振动波形[J]. 过程工程学报, 2006, 6(s1): 91. (MENG Xiang-ning, ZHU Mi-ao-yong. Non-sinusoidal oscillation profile for continuous casting mold with high casting speed[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(s1): 91.)

[7] 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. (MENG Xiang-ning, ZHU Miao-yong, LIU Xu-dong, et al. Study on non-sinusoidal oscillation factor for continuous casting mold with high casting speed[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(2): 205.)

[8] 张贺林, 朱果灵. 高速连铸用保护渣[J]. 钢铁研究学报, 1993, 5(2): 17. (ZHANG He-lin, ZHU Guo-ling. Mould powder for high speed casting[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1993, 5(2): 17.)

[9] 朱立光, 金山同. 高速连铸工艺中的结晶器保护渣技术[J]. 钢铁, 1998, 33(8): 68. (ZHU Li-guang, JIN Shan-tong. Mould flux for high speed casting[J]. Iron and Steel, 1998, 33(8): 68.)

[10] 段大福. 高拉速用连铸保护渣的研究现状[J]. 炼钢, 2005, 21(1): 53. (DUAN Da-fu. Review of R&D on high speed continuous casting mold flux[J]. Steelmaking, 2005, 21(1): 53.)

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

[12] Lee S M, Hwang J Y, Lee S H, et al. Revamping of the No. 2-3 slab caster at POSCO Gwangyang: Design, start-up and initial operation results[J]. Metallurgia Italiana, 2009: 33.

[13] Trinh M K, Sengupta J, Currey D, et al. Achievement of high-speed casting target at arcelormittal dofasco's No. 2 continuous caster: Technical approach and solution strategies[C]// AISTech. Indianapolis: [s. n.], 2011: 1507.

[14] 王新华. 日本高拉速板坯连铸及与热轧热联接技术介绍

- [N]. 中国冶金报,2006. (WANG Xin-hua. Introduction of high speed slab continuous casting and hot rolling connection technology in Japan[N]. China Metallurgical News,2006.)
- [15] Wada T,Suzuki H,Mori T. High speed casting of 3 meters/minute on the NKK Fukuyama Works' No. 5 slab caster[J]. Iron and Steelmaker,1987,14(9):31.
- [16] 高宏适. JFE炼钢厂提高生产效率的措施[J]. 世界金属导报,2017,6(B03). (GAO Hong-shi. Technologies to improve the efficiency in JFE steelmaking works[J]. World Metal Report,2017,6(B03).)
- [17] Kariya K,Kitano Y,Kuga M,et al. Development of flow control mold for high speed casting using static magnetic fields [C]//Steelmaking Conference. Chicago:[s. n.],1994:53.
- [18] Yamaguchi J,Nakashima T,Sawai T. Change and development of continuous casting technology [J]. Nippon Steel Technical Report,2013:13.
- [19] Kunstreich S,Dauby P H,Baek S-K,et al. Multi-mode EMS in thick slab caster molds and effect on coil quality and machine performance [C]//5th European Continuous Casting Conference. Nice:[s. n.],2005:20.
- [20] 顾武安,肖明富,杨素波,等. 攀钢2号板坯连铸机连铸工艺和铸坯质量研究[J]. 钢铁,2004,39(增刊):326. (GU Wu-an,XIAO Ming-fu,YANG Su-bo,et al. Study on the casting procedures and slab quality in No. 2 CCM in Panzhihua Iron and Steel Co[J]. Iron and Steel,2004,39(s):326.)
- [21] 段大福. 攀钢板坯高速连铸保护渣的研究[D]. 重庆:重庆大学,2005. (DUAN Da-fu. Study on Mould Fluxes in High Speed Slab Continuous Casting for Panzhihua Iron and Steel Co[D]. Chongqing:Chongqing University,2005.)
- [22] 陈永,肖明富,吴国荣,等. 攀钢板坯连铸高效化技术研究[J]. 钢铁钒钛,2009,30(3):50. (CHEN Yong,XIAO Ming-fu,WU Guo-rong,et al. Technology of high efficient slab caster at PISCO[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2009,30(3):50.)
- [23] 张兴中,倪满森. 连铸技术的发展状况及高效连铸[J]. 中国冶金,2003,13(3):17. (ZHANG Xing-zhong,NI Man-sen. Development of continuous casting and high efficient casting [J]. China Metallurgy,2003,13(3):17.)
- [24] 汪洪峰,宣守蓉. 梅钢高效高拉速板坯连铸的技术进步[J]. 梅山科技,2007(2):35. (WANG Hong-feng,XUAN Shou-rong. Technical improvement of high performance and high casting speed slab caster at Meigang[J]. Baosteel Meishan,2007(2):35.)
- [25] 阎朝红,王克勇,刘涌. 宝钢分公司4#连铸机提高板坯质量的措施[J]. 宝钢技术,2008(1):13. (YAN Chao-hong,WANG Ke-yong,LIU Yong. Measures for Baosteel Branch's No. 4 continuous caster to improve slab quality[J]. Baosteel Technology,2008(1):13.)
- [26] 刘启龙,王志政,臧红臣. IF钢板坯连铸工艺优化[J]. 钢铁,2011,46(8):36. (LIU Qi-long,WANG Zhi-zheng,ZANG Hong-chen. Optimization of slab continuous casting process for IF steel[J]. Iron and Steel,2011,46(8):36.)
- [27] 刘启龙. 汽车面板用IF钢连铸坯大型夹杂物的控制研究[D]. 北京:钢铁研究总院,2018. (LIU Qi-long. Study on the Control of Large Inclusions in IF Steel Continuous Casting Slab for Automobile Exposed Panel[D]. Beijing:Central Iron and Steel Research Institute,2018.)
- [28] 王洪兴,曹梅林,刘志国. 结晶器内钢液面波动分析与控制[J]. 炼钢,2012,28(3):37. (WANG Hong-xing,CAO Meilin,LIU Zhi-guo. Analysis and control on mold level fluctuation[J]. Steelmaking,2012,28(3):37.)
- [29] 李金柱,王胜东. 板坯连铸高拉速生产实践[J]. 连铸,2014,40(3):1. (LI Jin-zhu,WANG Sheng-dong. Production practice for high speed continuous casting slab [J]. Continuous casting,2014,40(3):1.)
- [30] 邓小旋,王新华,李林平,等. 水口底部形状对高拉速板坯连铸结晶器内钢液流股特征的影响[J]. 炼钢,2014,30(2):44. (DENG Xiao-xuan,WANG Xin-hua,LI Lin-ping,et al. Effect of nozzle bottom design on jet characteristics in continuous casting slab mold for high speed casting [J]. Steelmaking,2014,30(2):44.)
- [31] 邓小旋,熊霄,王新华,等. 水口底部形状对高拉速板坯连铸结晶器液面特征的影响[J]. 北京科技大学学报,2014,36(4):515. (DENG Xiao-xuan,XIONG Xiao,WANG Xin-hua,et al. Effect of nozzle bottom shapes on level fluctuation and meniscus velocity in high speed continuous casting molds [J]. Journal of University Science Technology Beijing,2014,36(4):515.)
- [32] 邓小旋. 高拉速板坯连铸结晶器内钢水流动特征与夹杂物研究[D]. 北京:北京科技大学,2013. (DENG Xiao-xuan. Investigation on Fluid Flow Control in the Mold Andnon-metallic Inclusions for High Speed Continuous Slab Casting[D]. Beijing:University of Science and Technology Beijing,2013.)
- [33] 邓小旋,季晨曦,潘宏伟,等. 板坯高拉速连铸台阶状水口的水模型研究[J]. 连铸,2016,41(2):64. (DENG Xiao-xuan,JI Chen-xi,PAN Hong-wei,et al. Water model study on step-shaped submerged entry nozzle for high speed slab Casting [J]. Continuous Casting,2016,41(2):64.)
- [34] 邓小旋,季晨曦,崔阳,等. 吹氩板坯连铸结晶器内钢水流态[J]. 钢铁,2016,51(10):23. (DENG Xiao-xuan,JI Chen-xi,CUI Yang,et al. Flow pattern in continuous casting slab mold with argon blowing [J]. Iron and Steel,2016,51(10):23.)
- [35] 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. (DENG Xiao-xuan,XIONG Xiao,WANG Xin-hua,et al. Water modeling study on submerged entry nozzles in continuous casting slab mold for high speed casting [J]. Journal of University of Science Technology Beijing,2013,35(10):1304.)
- [36] 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. (DENG Xiao-xuan,JI Chen-xi,HE Wen-yuan,et al. Periodic transient level fluctuations in continuous casting mold of slab [J]. Iron and Steel,2017,52(9):42.)

- [37] LI L, WANG X, DENG X, et al. Application of high speed continuous casting on low carbon conventional slab in SGJT[J]. Steel Research International, 2014, 85(11): 1490.
- [38] 李林平. 首钢京唐板坯高拉速工艺技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016. (LI Lin-ping. Investigation on High Speed Casting Technology for Conventional Slab Caster in Shougang Jingtang Co[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2016.)
- [39] 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. (LI Lin-ping, WANG Xin-hua, DENG Xiao-xuan, et al. High speed casting of 2.5 m/min on SGJT No. 3 slab caster[J]. Steelmaking, 2014, 30(6): 22.)
- [40] DENG X, JI C, DONG W, et al. Distribution of macro-inclusions in low carbon aluminium-killed steel slabs[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2018, 45(7): 592.
- [41] DENG X, JI C, CUI Y, et al. Formation and evolution of macro inclusions in IF steels during continuous casting[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2017, 44(10): 739.
- [42] DENG X, LI L, WANG X, et al. Subsurface macro-inclusions and solidified hook character in aluminum-killed deep-drawing steel slabs[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2014, 21(6): 531.
- [43] 廖建云. 攀钢 2 号板坯连铸机的设计特点[J]. 河南冶金, 2006, 14(s2): 181. (LIAO Jian-yun. Design characteristic of No. 2 slab continuous casting machine in Pansteel[J]. Henan Metallurgy, 2006, 14(s2): 181.)
- [44] 王洪兴. 降低板坯角部裂纹生产实践[J]. 炼钢, 2012, 28(2): 24. (WANG Hong-xing. Practice in reduction of corner crack in CC slab[J]. Steelmaking, 2012, 28(2): 24.)
- [45] 王新华. 高品质冷轧薄板钢中非金属夹杂物控制技术[J]. 钢铁, 2013, 48(9): 1. (WANG Xin-hua. Non-metallic inclusion control technology for high quality cold rolled steel sheets[J]. Iron and Steel, 2013, 48(9): 1.)
- [46] 朱国森, 邓小旋, 季晨曦, 等. 低碳钢板坯高拉速连铸技术研究[C] // 第四届中德(欧)冶金技术研讨会论文集. 杜塞尔多夫: 中国金属学会, 2014: 157. (ZHU Guo-sen, DENG Xiao-xuan, JI Chen-xi, et al. Research on high speed continuous casting technologies for low carbon steel slabs[C] // Joint Seminar of Chinese Society of Materials and Steel Institute VDEh. Düsseldorf: China Society of Metals, 2014: 157.)
- [47] Yoshida J, Ohmi T, Iguchi M. Cold model study of the effects of density difference and blockage factor on mold powder entrainment[J]. ISIJ International, 2005, 45(8): 1160.
- [48] Yoshida J, Iguchi M, Yokoya S. Water model experiment on mold powder entrapment around the exit of immersion nozzle in continuous casting mold[J]. Tetsu-To-Hagane, 2001, 87(8): 529.
- [49] Watanabe T, Iguchi M. Water model experiments on the effect of an argon bubble on the meniscus near the immersion nozzle[J]. ISIJ International, 2009, 49(2): 182.
- [50] 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.
- [51] Imamura A, Kusano A, Moritama N. A hydrodynamical analysis of the molten steel flow in the continuous casting mold[J]. Tetsu-To-Hagane, 1992, 78(3): 439.
- [52] Kasai N, Kawasaki M, Hanazaki K, et al. Effect of the molten steel flow on powder trapping in the continuous casting mould[J]. CAMP-ISIJ, 1990, 3(4): 1114.
- [53] Tozawa K, Idogawa S, Nakato S, et al. Investigation of periodical change of molten steel flow and entrainment of mold powder[J]. CAMP-ISIJ, 1996, 9(4): 604.
- [54] 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.
- [55] Tanaka H, Kuwatori H, Nishihara R. Analysis of continuous casting powder entrapping phenomena by water-model experiments[J]. Tetsu-To-Hagane, 1992, 78(5): 761.
- [56] Yamashita S, Iguchi M. Mechanism of mold powder entrapment caused by large argon bubble in continuous casting mold[J]. ISIJ International, 2001, 41(12): 1529.
- [57] 雷洪, 许海虹, 朱苗勇, 等. 高速连铸结晶器内卷渣机理及其控制研究[J]. 钢铁, 1999, 34(8): 20. (LEI Hong, XU Hai-hong, ZHU Miao-yong, et al. Mechanism and control of slag entrapment in high casting mould[J]. Iron and Steel, 1999, 34(8): 20.)
- [58] 雷洪, 朱苗勇, 赫冀成. 连铸结晶器内卷渣过程的数学模型[J]. 金属学报, 2000, 36(10): 1113. (LEI Hong, ZHU Miao-yong, HE Ji-cheng. Mathematical modeling of slag entrapment in continuous casting mould[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(10): 1113.)
- [59] 齐新霞, 刘国林, 包燕平, 等. 板坯连铸机结晶器钢液卷渣的水模型研究[J]. 特殊钢, 2004, 25(3): 29. (QI Xin-xia, LIU Guo-lin, BAO Yan-ping, et al. A study of water model on slag entrapment of molten steel in mould of slab continuous caster[J]. Special Steel, 2004, 25(3): 29.)
- [60] 陆巧彤, 王新华, 于会香, 等. F 数计算及其与板坯连铸结晶器内钢水卷渣的关系[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 811. (LU Qiao-tong, WANG Xin-hua, YU Hui-xiang, et al. Calculation of F value and relationship between F value and slag entrapment in a slab continuous casting mold[J]. Journal of University of Science Technology Beijing, 2007, 29(8): 811.)
- [61] 王现辉, 王新华, 张炯明, 等. CSP 结晶器内卷渣的瞬态特征[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 764. (WANG Xian-hui, WANG Xin-hua, ZHANG Jiong-ming, et al. Transient slag entrapping characteristics in CSP mould[J]. Journal of University of Science Technology Beijing, 2009, 31(6): 764.)
- [62] 张宁, 雷洪, 刘承军, 等. 连铸结晶器内液面波动及卷渣行为的物理模型研究[J]. 连铸, 2010, (1): 30. (ZHANG Ning, LEI Hong, LIU Cheng-jun, et al. Physcial model research on slag entrapment and surface disturbance in continuous casting

- mold[J]. Continuous Casting,2001,(1):30.)
- [63] 包燕平, 朱建强, 蒋伟, 等. 薄板坯结晶器内卷渣现象的研究[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(6): 530. (BAO Yan-ping, ZHU Jian-qiang, JIANG Wei, et al. Water moldelng research on slag-entrapment in the mould of thin slab continuous caster [J]. Journal of University of Science Technology Beijing, 1999, 21(6): 530.)
- [64] 陈芝会, 王恩刚, 王清成, 等. 薄板坯连铸结晶器内涡流及卷渣行为的研究[J]. 炼钢, 2005, 21(5): 37. (CHEN Zhi-hui, WANG En-gang, WANG Qing-cheng, et al. Study on votex flux and slag entrapment behavior in the mold in thin slab continuous casting[J]. Steelmaking, 2005, 21(5): 37.)
- [65] 孙彦辉, 韦耀环, 蔡开科, 等. 宽板坯连铸结晶器内卷渣现象试验研究[J]. 钢铁, 2007, 42(11): 31. (SUN Yan-hui, WEI Yao-huan, CAI Kai-ke. Experimental research of mold powder entrapment in wide slab caster mold[J]. Iron and Steel, 2007, 42(11): 31.)
- [66] 张胜军, 朱苗勇, 张永亮, 等. 高拉速吹氩板坯连铸结晶器内的卷渣机理研究[J]. 金属学报, 2006, 42(10): 1087. (ZHANG Sheng-jun, ZHU Miao-yong, ZHANG Yong-liang, et al. Study on mechanism of entrapment in slab continuous casting mould with high casting speed and argon blowing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(10): 1087.)
- [67] Tsai H T, Sammon W J, Hazeltan D E. Characterization and countermeasures for sliver defects in cold rolled products [C]//Steelmaking Conference Detroit. Michigan: Iron and Steel Society Inc, 1990: 49.
- [68] Zhang L, Thomas B G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness[J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 271.
- [69] 曹娜, 朱苗勇. 高拉速板坯连铸结晶器内钢/渣界面行为的数值模拟[J]. 金属学报, 2007, 43(8): 834. (CAO Na, ZHU Miao-yong. Numerical simulation for the interfacial behavior of steel and slag in a conrinuous casting mold with high casting speed[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(8): 834.)
- [70] 熊霄, 邓小旋, 王新华, 等. 水口出口形状对高拉速板坯连铸结晶器内流场特征的影响[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(7): 35. (XIONG Xiao, DENG Xiao-xuan, WANG Xin-hua, et al. Effect of port-shape design on fluid flow in high-speed slab continuous casting mold[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2014, 26(7): 35.)
- [71] Bai H, Thomas B. Turbulent flow of liquid steel and argon bubbles in slide-gate tundish nozzles; Part I. Effect of operation conditions and nozzle design[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2001, 32(2): 269.
- [72] Nagai J, Suzuki K, Kojima S, et al. Steel flow control in a high-speed continuous slab caster using an electromagnetic brake[J]. Iron and Steel Engineer, 1984, 61(5): 41.
- [73] 鈴木健一郎, 村田賢治, 中西恭二, et al. 電磁ブレーキによる連铸々型内の溶鋼流動の制御[J]. 鉄と鋼, 1982, 68: S920.
- [74] Manneveld D, Brockhoff J P, Rabenberg J M, et al. The EM-BR: A new metallurgical instrument for clean steel? First results at Hoogovens IJmuiden [J]. Revue de Metallurgie, 1993, 90(4): 513.
- [75] 陈芝会, 王恩刚, 赫冀成. 板坯连铸结晶器电磁制动技术及其应用[J]. 炼钢, 2004, 20(3): 48. (CHEN Zhi-hui, WANG En-gang, HE Ji-cheng. Electromagnetic brake technique and its application in the mould of continuous casting[J]. Steel-making, 2004, 20(3): 48.)
- [76] Zeze M, Harada H, Takeuchi E, et al. Application of DC magnetic field for the control of flow in the continuous casting strand[C]//76th Steelmaking Conference. Dallas: Iron and Steel Society Inc, 1993: 267.
- [77] Washio M, Sugizawa M, Moriwaki S, et al. Development of flow control mold for high speed continuous casting using electromagnetic brake [J]. Revue de Metallurgie, 1993, 90(4): 507.
- [78] WANG S, ZHANG L, WANG Q, et al. Effect of electromagnetic parameters on the motion and entrapment of inclusions in FC-Mold continuous casting strands[J]. Metallurgical Research and Technology, 2016, 113(205): 1.
- [79] 邓小旋, 潘宏伟, 李晨曦, 等. 首钢京唐 FC-mold 工艺技术研究[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 冶金工业出版社, 2017. (DENG Xiao-xuan, PAN Hong-wei, JI Chen-xi, et al. The application of FC mold in conventional slab casting mold in SGJT[C]//11th Annual China Iron and Steel Conference. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.)
- [80] 焦兴利, 刘启龙, 臧红臣, 等. 浇铸 IF 钢的 FC 结晶器工艺参数优化试验[J]. 连铸, 2010(2): 25. (JIAO Xing-li, LIU Qi-long, ZANG Hong-chen, et al. Optimization of FC-mould technical parameter for IF steel[J]. Continuous Casting, 2010(2): 25.)
- [81] 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(4): 53. (ZHONG Yun-tao, PAN Han-yu, Jacobson N, et al. Development trends of mold flow control in slab casting[J]. Baosteel Technology, 2016(4): 53.)
- [82] Kubota J, Okimoto K, Shirayama A, et al. Meniscus flow control in the mold by traveling magnetic field for high speed slab caster[C]//Steelmaking Conference. Washington: Iron and Steel Society Inc, 1991: 233.
- [83] Dauby P H. Real flows in continuous casting molds[J]. Iron and Steel Technology, 2011, 8(6): 152.
- [84] 王新华. 中国钢铁工业转型发展时期炼钢科技进步的展望[J]. 炼钢, 2019, 35(1): 1. (WANG Xin-hua. Outlook on progress of steelmaking technology in transition period of Chinese steel industry[J]. Steelmaking, 2019, 35(1): 1.)
- [85] Ehara T, Kurose Y, Fujimura T, et al. Mass production of high quality IF steel at Mizushima Works[C]//Steelmaking Conference. Pittsburgh: [s. n.], 1996: 485.
- [86] Takatani K, Nakai K, Kasai N, et al. Analysis of heat transfer and fluid flow in the continuous casting mold with electromagnetic brake[J]. ISIJ International, 1989, 29(12): 1063.