

异钢种连浇研究进展及发展方向

宋思程, 孙彦辉*, 吴华杰, 安航航

(北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心, 北京 100083)

摘 要: 针对高附加值钢种的需求量较小, 一个浇次需要生产不只一个钢种的现状, 梳理了国内企业进行的异钢种连浇工业试验, 描述了水模型试验和数值模拟在异钢种连浇过程的应用, 主要总结了中间包液位高度、非等温浇注、中间包内腔结构、结晶器流体域结构、连铸机拉速和电磁制动等因素对交接坯长度的影响。评价了目前主流的四种交接坯判定模型, 最终提出了制定异钢种连浇过程规范和研究异钢种连浇过程新模型思路。结果表明, 异钢种连浇实现了新钢种的高效生产, 降低了企业生产成本, 同时将人工智能学科与冶金学科结合了起来, 为异钢种连浇过程提供了一个新的发展方向。

关键词: 连铸; 异钢种连浇; 交接坯; 传输行为; 数学模型

中图分类号: TF777

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)03-0131-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.03.018

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Research progress and development direction of steel grade transition

Song Sicheng, Sun Yanhui*, Wu Huajie, An Hanghang

(School of Collaborative Innovation Center of Steel Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The demand for high value-added steel grades is relatively low, and more than one steel grade needs to be produced per casting sequence. Industrial tests of the steel grade transition carried out by domestic enterprises is sorted out in this paper. The application of water model experiment and numerical simulation in the steel grade transition is described. And the influence of tundish level, non-isothermal casting, tundish furniture, mold fluid domain structure, casting speed and electromagnetic braking on the length of transition billets is mainly summarized. After evaluating the four main mathematical models for judging the steel grade transition, the idea of formulating the specification for the steel grade transition and studying the new model for the steel grade transition is finally put forward. It can be concluded that the steel grade transition realizes the efficient production of new steel grades, reduces the production cost of enterprises. combining the disciplines of artificial intelligence and metallurgy practice can provide a new development direction for metallurgical engineering.

Key words: continuous casting, steel grade transition, transition billet, transport phenomena, mathematical model

收稿日期: 2023-04-11

作者简介: 宋思程, 1997 年出生, 男, 山西长治人, 博士, 主要从事异钢种连浇过程数值模拟, E-mail: sicheng_song1996@163.com; * 通讯作者: 孙彦辉, 1971 年出生, 男, 北京人, 博士, 教授, 主要从事夹杂物及连铸工艺, E-mail: sunyanhui@metall.ustb.edu.cn。

0 引言

随着科技的发展,越来越多的钢种被开发出来以满足不同的应用场景,这些新开发的钢种一般附加值较高,但需求量较小^[1]。传统生产方法只能在每个浇次中生产一个钢种,但随着近些年冶金工艺水平逐步提升,连铸机的连浇炉数也屡创新高^[2],这与高附加值钢种的较小需求量产生了矛盾。钢厂停止生产旧钢种转而生产新钢种的方法主要有异钢种连浇、中间包快换、插入结晶器隔板以及连铸机重新开浇^[3-4],其中异钢种连浇技术的应用更为广泛。

异钢种连浇技术使新旧钢液在冶金容器中混合,混合钢水形成的连铸坯被称为交接坯。准确划分交接坯与正常坯可以保证铸坯质量,避免钢种不合格带来的损失。但是,种类繁多的钢种、动态变化的拉速、不同的浇注顺序等尚未明确的浇注制度为交接坯的准确划分带来了诸多挑战。因此,揭示异钢种连浇过程合金元素在交接坯中的分布规律,并寻求资源利用与产品质量之间的平衡具有重要的研究意义。

异钢种连浇过程处于高温、高压的生产环境,难以直接观察合金元素的流动与混合行为。研究人员常采用数值模拟研究异钢种连浇过程,并采用水

模型物理模拟和取样分析验证数值模拟结果。异钢种连浇过程的数值模拟需要建立包含流动-凝固-传热-电磁和传质等的多物理场耦合模型,其中钢液流动引起的混合现象和凝固过程的溶质再分配现象是影响交接坯成分的两大主要因素。在掌握合金元素在交接坯中的分布规律后,建立能够准确划分交接坯位置并缩短交接坯长度的数学模型才是异钢种连浇技术的最终目标。

1 国内异钢种连浇的工业试验

国内很多钢厂进行了异钢种连浇试验。从铸坯试样的分析结果可知,异钢种连浇初期的钢水成分变化快于后期,所以异钢种连浇过程对旧钢种尾坯的影响小于新钢种头坯^[5-6]。另外,在光谱分析中还发现 C 和 Al 元素变化规律不明显,这可能是因为 C 和 Al 元素的固相扩散系数较高,也可能是发生化学反应后形成了沉淀物,具体情况取决于钢种成分^[4]。

我国部分钢厂进行的工业试验见表 1。从 1995 年至今,鞍钢、武钢、济钢、迁钢、湘钢、包钢、涟钢和淮钢在生产现场先后进行了异钢种连浇试验。试验钢种的范围从低碳覆盖到高碳,从普钢覆盖到特钢。另外,异钢种生产的铸机类型也多种多样,包括小方坯、大方坯、板坯和圆坯。

表 1 中国部分钢厂的异钢种连浇工业试验
Table 1 Industrial tests of steels grade transition in some steel plants in China

年份	作者	公司	铸机	钢种	参考文献
1995	陆云威	鞍山钢铁	小方坯	Q235 - 70Y	[7]
2013	曹同友	武汉钢铁	板坯	SPHC - No.45	[8]
2014	王嘉祺	济南钢铁	板坯	微合金中碳钢、微合金包晶钢和微合金低碳钢	[6]
2014	干明	迁安钢铁	板坯	超低碳钢、低碳钢、包晶钢和中碳钢	[9]
2015	张川	湘潭钢铁	板坯	Q550D - Q345E和 Q345B - Q355QK	[10]
2016	李东明	包头钢铁	大方坯	15MnNbV - No.20, No.20 - 13MnTi, 37Mn5 - 36Mn2VT和 10CrMoTi - 32Mn6	[11]
2018	吕志勇	鞍山钢铁	板坯	Q235B - SAE1012M和 Q235B - SAE1010	[12]
2019	隋亚飞	涟源钢铁	板坯	含镍钢	[13]
2021	杨丽梅	淮安钢铁	圆坯	20Cr - SCr15和4130X - 30CrMo	[14]

一些学者还采用其他方法研究了异钢种连浇过程。张川等^[10]发现 Q345B 与 Q355QK 交接坯轧制后的力学性能完全能满足 Q345B。李东明等^[11]采取铸机停拉制造铸坯接痕的方法确定了交接坯的起始位置。吕志勇等^[12]认为中间包液位减低后中间包温降太快,因此要将旧钢种的温度控制到目标温度的中上限。隋亚飞等^[13]发现交接坯厚度方向的边部和中心成分差异显著。横截面 2.05 m 之后的

交接坯边部成分与此横截面的中心成分一致。杨丽梅和郑力宁^[14]发现连铸坯断面越大,交接坯越长。Ø600 mm 铸机产生交接坯长度是 Ø380 mm 的 2.7 倍左右。

采用异钢种连浇技术后,迁钢在 2014 年平均每月减少 70 个短浇次^[9];湘钢连铸机的平均连浇炉数由 8.6 炉增加到 16 炉,平均每月减少 25 个浇次^[10];鞍钢通过优化异钢种连浇工艺,使连浇炉数由 9.3

炉提高至 9.6 炉, 为每吨钢水节约了 0.26 元的生产成本^[12]。

2 异钢种连浇的数值模拟及物理模拟研究

通过工业试验验证了异钢种连浇的可行性后,

大量学者采用水模型试验和数值模拟研究减少交接坯长度的具体措施^[15], 如图 1^[15]所示。Huang 和 Thomas^[4]认为湍流引起的溶质质量传输比分子扩散大几个数量级。以此为基础, 学者们主要研究了中间包及铸坯的液相区中湍流引起的溶质质量传输现象。

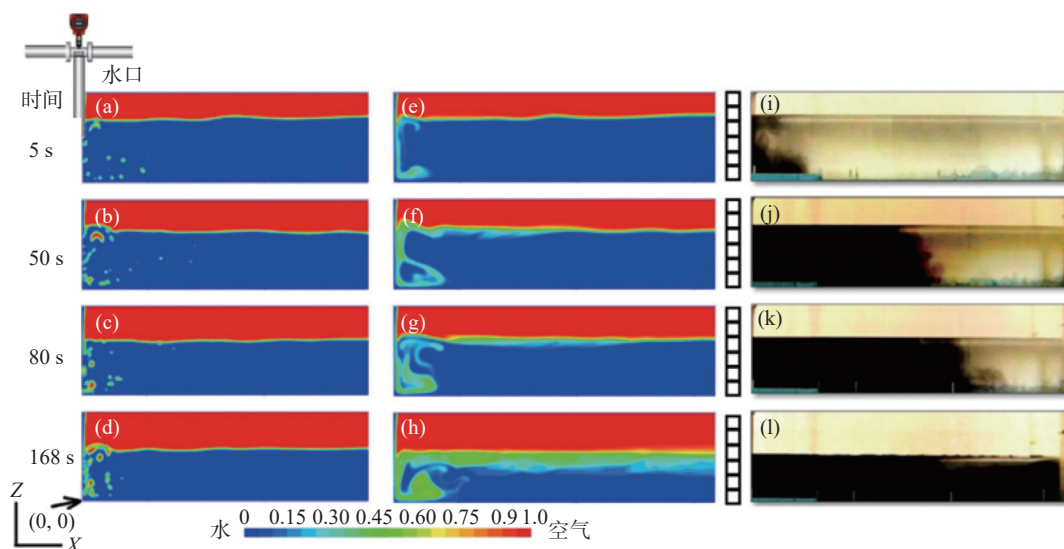


图 1 异钢种连浇过程数值模拟结果与水模型试验照片^[15]

Fig. 1 Numerical simulation results of the steel grade transition and photos of water model experiment

2.1 中间包钢液的成分变化

在异钢种连浇过程的中间包区域, 中间包液位控制、非等温条件及中间包内腔结构对交接坯的长度有一定影响^[16]。

2.1.1 中间包液位控制

降低中间包液位是缩短交接坯长度最有效的方法^[17]。Oro 等^[18]研究了中间包液位实时变化对钢液成分的影响。毕经汉^[19]、李涛^[20]及张剑君^[21]认为缩短交接坯长度应尽量降低中间包液位, 但要避免低液位卷渣, 以防造成铸坯质量问题。Branislav 等^[22]在水模型试验中采用超低液位, 使交接坯长度缩短 20%, 并且发现该方案的夹杂物数量较高区域恰巧与铸坯成分不合格区域重合, 其水模型试验装置如图 2^[22]所示。刘超^[23]所研究的中间包在空包时间为 4 min、中间包液位为 594 mm 且添加中间包挡墙的情况下最有利于缩短交接坯长度。

2.1.2 非等温条件连浇

非等温条件对交接坯长度的影响也不能忽略。Damle 和 Sahai^[24]基于非等温条件下水模型试验及数值模拟发现在新旧钢液温度不同时, 除了要保证试验的几何相似和动力相似, 还要保证热相似。Sinha 和 Vassilicos^[25]发现新旧钢种温度不同会影

响中间包死区、活塞流区和全混流区的比例。Amorim 等^[26]通过水模型试验和数值模拟发现异钢种连浇过程不仅要考虑钢液的过热度, 还要考虑钢液的密度, 这两者对六流连铸机的交接坯长度都有很大的影响, 水模型试验的钢种混合过程如图 3^[26]所示。

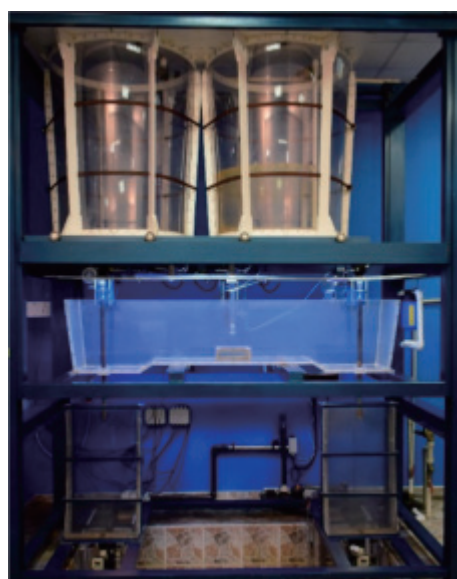


图 2 异钢种连浇过程中间包水模型试验装置^[22]

Fig. 2 Experimental device of tundish water model for the steel grade transition

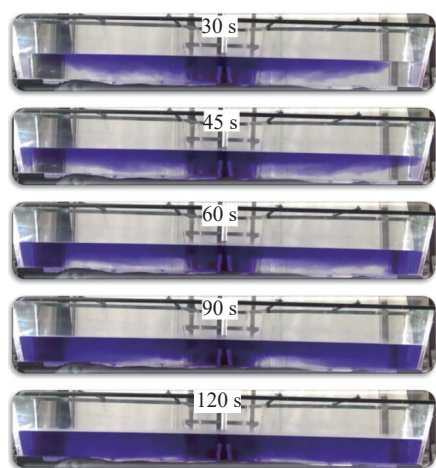


图3 水模型墨汁试验照片^[26]
Fig. 3 Photos of water model ink experiment

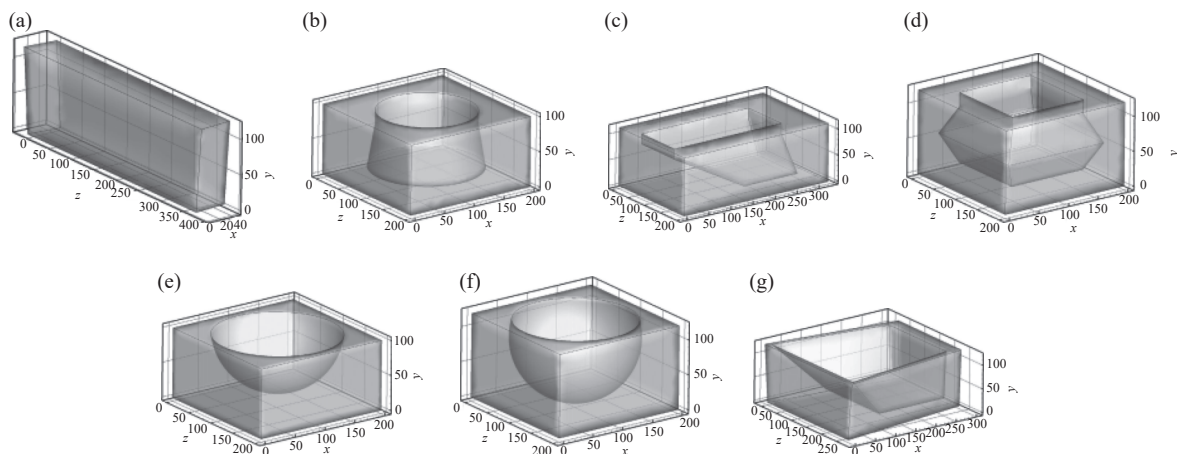


图4 挡坝及湍流抑制器形状^[28](单位:mm)
Fig. 4 Schematic shape of dam and turbulence suppressor

2.1.3 中间包内腔结构

中间包内腔结构对交接坯长度的影响比降低中间包液位和非等温条件^[29],不过在降本增效的需求下仍有较大的研究意义,并成为近些年异钢种连浇领域的研究热点。改变中间包的坝、堰、湍流抑制器、包型和长水口浸入深度等内腔结构可以改变中间包流场,进而影响交接坯长度。

坝和堰可以增加中间包的活塞流区比例,减少新旧钢液的混合,从而减小交接坯长度。郭春牧等^[30]研究了异钢种连浇过程无坝无堰、单坝单堰和双坝双堰三种不同的中间包内腔结构,它们新钢种浓度达到80%分别需350、345、160 s,90%分别需600、500、290 s,说明加坝和堰可以缩短交接坯长度。Kant等^[31]认为在中间包中加入坝可以减少交接坯长度,而加入堰对交接坯长度几乎没有影响,

因此,研究非等温条件浇注顺序和限制非等温条件对异钢种连浇过程尤为重要。Chattopadhyay等^[27]计算了非等温条件下夹杂物的数量变化。他们发现新钢种温度高于旧钢种时,由于浮力作用增强了夹杂物的去除。而新钢种温度低于旧钢种时,低温钢水会将中间包钢液推入结晶器,恶化铸坯质量。Cwudziński^[28]研究了挡坝和6种湍流抑制器对异钢种连浇的影响,如图4^[28]所示。发现钢液流速较低时自然对流主要影响钢液的混合过程,而流速较高时湍流抑制器可以有效限制钢液的惯性。高挡坝(如图4(a)^[28])和湍流抑制器(如图4(g)^[28])联合使用可以减少非等温条件的影响。

当坝放置在中间包近流附近时交接坯最短。Kumar等^[32]认为中间包挡墙和挡坝能有效缩短交接坯长度,且坝存在一个最佳高度用于缩短交接坯。Agarwal等^[33]设计了两种挡坝(图5)研究异钢种连浇过程,其中图5(a)方案可以减少21 t交接坯。

湍流抑制器的使用会增强新旧钢液的混合,对交接坯长度有较大影响。Kumar等^[34]发现中间包钢液的湍流流动是交接坯长度增加的主要原因。Siddiqui和Jha^[35]利用数值模拟研究了长水口钢液流速和湍流抑制器对交接坯长度的影响,并用1:4的水模型试验验证了数值模拟结果。结果发现湍流抑制器会增加交接坯长度。而A. Muralikrishna等^[36]却认为湍流抑制器可以减少交接坯长度,并对无湍流抑制器和有湍流抑制器的中间包分别开发了预测异钢种连浇过程的数学模型。

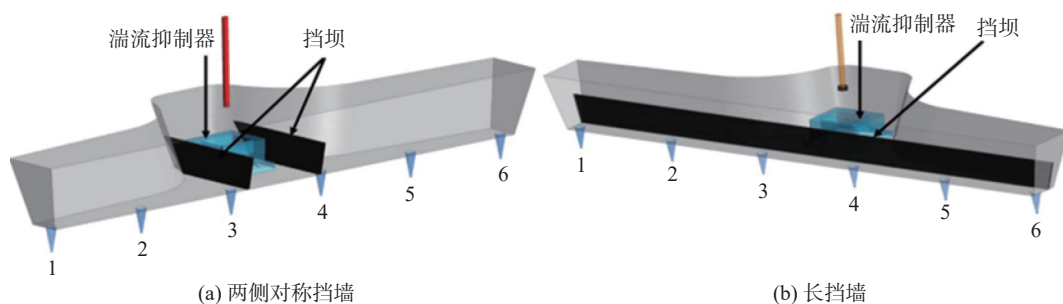
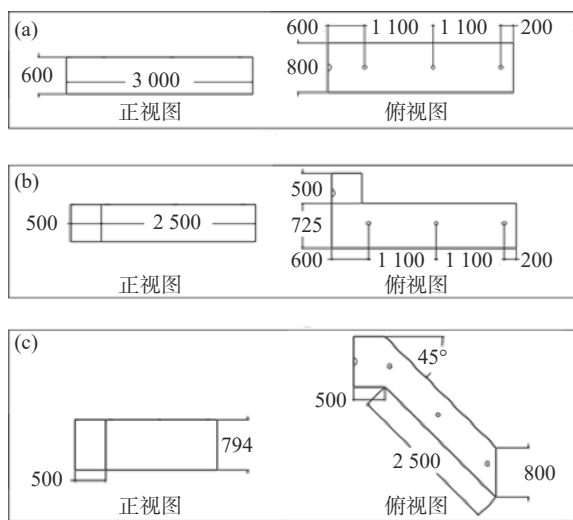
图5 两种中间包挡坝^[33]

Fig. 5 Two types of tundish dam

对于中间包包型和长水口浸入深度对交接坯长度的影响, Kumar 等^[34]采用数值模拟研究了 I 型、T 型和 V 型中间包(如图 6^[34]所示)的异钢种连浇过程。研究表明, V 型中间包的交接坯长度比 I 型和 T 型短。Siddiqui 和 Kim^[17]采用数值模拟研究了长水口浸入深度、湍流抑制器、挡坝高度和挡坝位置等四个参数的相互作用。研究表明, 长水口浸入深度为 38 %, 湍流抑制器内墙倾角为 60°, 挡坝高度为 0.45 m, 挡坝位置距中间包中心距离为 0.7 m 时交接坯最短。



(a) I 型中间包; (b) T 型中间包; (c) V 型中间包

图6 不同中间包外形^[34](单位:mm)

Fig. 6 Different tundish shapes

不同钢流之间的钢液成分在异钢种连浇时存在差异^[15]。由于正常连铸的钢液成分保持不变, 所以中间包各流的流动状态不一致对各流铸坯的成分没有影响。但在异钢种连浇过程中, 新旧钢液经过中间包混合后流入钢流, 中间包各流的流动状态不一致会使各流铸坯的成分变化有很大差异。孟娜等^[37]认为六流中间包的异钢种连浇近流交接坯长度最短,

中流中等, 远流最长。Agarwal 等^[33]通过印度塔塔钢铁公司六流中间包观察到离长水口最近的钢流存在短路流现象。此外, 研究了关闭一个或两个钢流对交接坯长度的影响。当关闭一个钢流时, 关闭靠近长水口的钢流会使交接坯最长。当关闭两个钢流时, 关闭靠近长水口的钢流会使交接坯最短。Kumar 等人^[34]的研究结果与孟娜等^[37]一致, 他们认为离长水口最远的浸入式水口会接收离长水口最近的浸入式水口附近的混合钢水, 导致其交接坯长度增加。

控流装置不仅会影响交接坯长度, 同时也直接影响着稳态浇注的中间包流场。此两者的优化目标比较类似, 均需要较小的死区比例。较小的死区比例使异钢种连浇过程在中间包剩余的旧钢液比例较少, 同时能减少稳态浇注过程钢液的不活跃区域。另外异钢种连浇过程需要较小的全混流区比例, 以减少新旧钢液的混合, 从而获得较短的交接坯长度。而稳态浇注过程则需要较大的活塞流区比例以延长钢液在中间包内的流动距离, 增加大尺寸夹杂物的上浮时间。因此两者的优化目标基本一致。

2.2 结晶器钢液的成分变化

在异钢种连浇过程中, 新旧钢液除了在中间包区域混合外, 在铸流中的混合同样不能忽略^[37-39]。在结晶器中, 流体域结构、铸机拉速以及电磁制动等因素均会影响新旧钢液的混合, 进而影响交接坯长度。

2.2.1 结晶器流体域结构

Huang 和 Thomas^[40-41]开发了三维加一维的铸流数值模拟用于研究交接坯成分, 并采用 Inland 钢铁厂的工业试验数据验证了该模型。研究发现交接坯长度主要取决于结晶器厚度, 而几乎不受结晶器宽度的影响。结晶器水口结构、浸入深度以及向浸入式水口注入氩气只会影响交接坯表面成分, 而对交接坯内部成分没有影响。

Lan 和 Khodadadi^[42]计算了圆坯连铸机采用中

间包快换方法生产新钢种的过程。研究发现当新中间包温度高于旧中间包温度时,铸流液相体积的增加并不显著,而糊状区体积却明显增加,相对于其初始体积,其增加幅度高达 48%。同时,检测到铸坯表面温度有明显的提高,在生产中必须考虑中间包更换过程可能导致的结晶器出口凝固壳变薄的问题,以防止漏钢。Michalek 等^[43]通过工业试验研究了直径为 525 mm 的圆坯连铸机在异钢种连浇时浸入式水口结构对交接坯长度的影响。研究表明,采用直通型水口时新钢水的穿透深度最大,约为 5.6 m。Jeong 等^[44]建立了异钢种连浇过程钢液流动和凝固的数值模拟。研究发现大多数三维湍流发生在结晶器区域。

2.2.2 铸机拉速

一些学者认为铸坯拉速对交接坯长度的影响不大^[15,33,38],当前尚未得出铸机拉速对交接坯长度影响的统一规律。

部分学者^[4,45]认为提高铸机拉速尽管减少了钢种过渡时间,但增加了新旧钢液的混合程度,增加交接坯总量。而另一些学者^[20-21,35-36]认为提高铸机拉速会减少交接坯长度。孙增晓^[46]的研究表明拉速为 0.52 m/min 时交接坯平均长度为 7.473 m;拉速为 0.78 m/min 时交接坯平均长度为 5.343 m。毕经汉^[19]认为钢液在结晶器液相穴内的冲击深度与拉速和断面分别呈线性关系,随着拉速增加,交接坯的起点位置基本不变,但交接坯终点位置随着拉速的增加而提前。

2.2.3 电磁制动

电磁制动可以降低钢液在结晶器内的流速和湍动能,减少新旧钢液的混合,从而显著减少交接坯长度。Li 和 Tsukihashi^[47]通过数值模拟研究了板坯电磁制动对交接坯长度的影响。研究发现静磁场显著抑制了结晶器下部的钢水的混合,在 0.5 T 的磁场作用下,交接坯长度减小了约 50%。Ahn 等^[48]考虑了薄板坯电磁制动对交接坯长度的影响。结果表明,结晶器中下旋涡受电磁场抑制形成了活塞流,缩短了交接坯长度。

3 交接坯判定模型

通过以上研究对异钢种连浇过程有了较为清晰的认识后,如何在连铸机上应用以上研究成果快速指导现场生产已成为当前的研究重点之一^[49]。建立预测异钢种连浇过程的数学模型可以实时预测交接坯位置及长度,弥补了试验及模拟时效性的不足。

预测交接坯位置及长度的数学模型主要分为四种。

3.1 模拟结果拟合模型

首先通过水模型试验和数值模拟研究不同拉速、液位高度和浇注顺序的异钢种连浇,获取停留时间分布(RTD)曲线。然后采用数据分析软件将上述 RTD 曲线拟合为公式,以满足不同的异钢种连浇过程。侯基林^[50]发现异钢种连浇过程的 RTD 曲线可用指数函数来描述。

毕经汉^[19]通过 SPSS 软件对试验数据进行数据拟合,发现混合率和混合时间能较好的服从对数关系,可以通过式(1)描述。

$$\eta = a \ln(t) + b \quad (1)$$

式中, η 为新旧钢种的混合率,大包刚开浇时,定义 $\eta = 0$,当中间包完全被后一种钢液充满之后,定义 $\eta = 1$; a 和 b 为拟合函数的系数,可通过 RTD 曲线拟合其值; t 为时间。

李涛^[20]拟合了从水模型试验中获得的 RTD 曲线,其拟合方程为式(2)。

$$y = A_1 + (A_1 - A_2)/(1 + (t/x_0)^p) \quad (2)$$

式中, y 为新旧钢种的混合率; A_1 的取值为 0.025 ~ 0.050,其值相对于 A_2 很小,对曲线的变化趋势几乎没有影响,只是对拟合曲线的起始值有略微的改变; A_2 主要用于控制新旧钢种的过渡速度; t 为时间; x_0 和 p 为曲线系数,由 RTD 曲线拟合求得。

3.2 反应工程学计算模型

反应工程学计算模型也是预测交接坯长度的常用方法,对不同铸机都有较好的适应性^[3]。Huang 和 Thomas^[5,49]建立的模型需通过模拟获取 8 个参数。最终将此预测模型应用在 Armco 和 BHP 两个钢厂。Goldschmit 等^[51]建立了四流中间包交接坯数学模型,他们提出的两步法填充中间包可以减少异钢种连浇过程的交接坯长度。Cho 和 Kim^[52]提出了只需一个参数的中间包模型,并采用单流和 4 流两种中间包水模型试验验证了该模型。之后 Cho 和 Kim^[53]将 Cho 和 Kim^[52]的中间包模型扩展到钢流上,并分别采用板坯(铸坯成分如图 7^[53])、大方坯和薄板坯三种连铸机验证了新模型。

Alizadeh 等^[54]提出一种考虑非等温条件的异钢种连浇数学模型,模型流程设计如图 8^[54],并通过工业试验验证了模型的准确性(如图 9^[54])。Braga 和 Tavares^[55]为 Cho 和 Kim^[52]的异钢种连浇预测模型提供了一套便于使用的方案,还研究了模型参

数 f 的意义: 如果 $f \leq 1$, $(1-f)$ 为支流的流量比, 否则 $-(1-f)/f$ 为活塞流区的体积分。

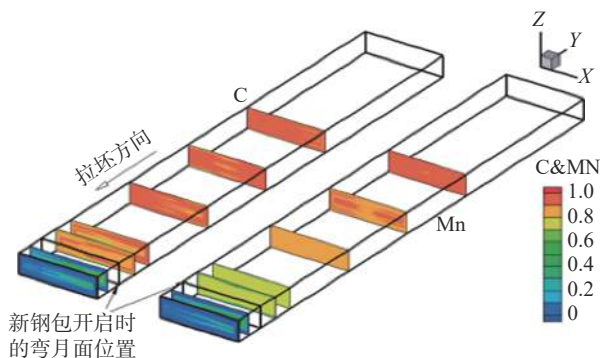


图7 交接坯实际检测成分云图^[53]

Fig. 7 The measured composition contours in the mixed zone for the slab caster

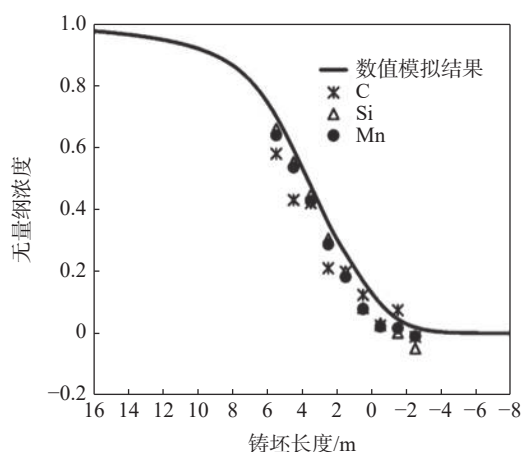


图9 连铸坯成分预测值和测量值的比较^[54]

Fig. 9 Comparison of predicted and measured slab composition

3.3 脉冲激光法检测模型

西班牙的研究人员开发了脉冲激光光谱法用以检测交接坯的成分。Ruiz 等^[56]使用双脉冲激光光谱法在温度高达 900 °C 且长 7.6 m 的不锈钢铸坯上识别了铸坯成分, 找出了准确的切割位置。在 Sidenor 钢铁厂中, Cabalin 等^[57]将双脉冲激光光谱仪安装在距铸坯 3.6 m 的生产线上进行测试, 测试结果表明, 生产现场的高温、机械振动、灰尘等对测试结果的影响以及测试对铸坯的损伤可以忽略不计。

3.4 人工智能预测模型

人工智能在异钢种连浇领域也有较大发展前景。Zhao 等^[58]基于最小二乘法支撑向量机制建立了人工智能预测交接坯长度的模型, 并采用改进的粒子群优化算法优化了该模型的参数。最终实现了不同

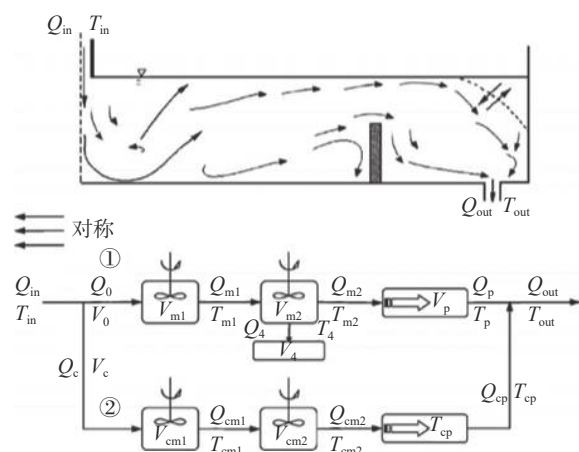
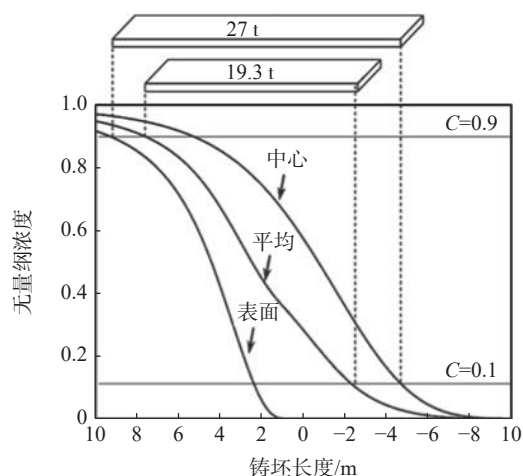


图8 非等温条件下的中间包混合模型流程图及相应的中间包流场示意图^[54]

Fig. 8 Flowchart of tundish mixing model for non-isothermal conditions with schematically corresponding flow pattern in the tundish



拉速及不同中间包液位的交接坯成分预测。

4 发展与讨论

异钢种连浇技术从上世纪 80 年代发展至今取得了较大的研究进展, 已经建立了能用于指导现场生产的预测模型。当前的模型还存在预测精度较差的问题, 需要进一步的研究。

4.1 异钢种连浇的三次发展

异钢种连浇在历史上存在三次较大的发展。第一次集中于流动引起的钢液混合现象。19 世纪 80 年代学者首先研究了中间包钢液的流动现象, 之后研究了钢液在钢流中的混合, 最后通过模拟结果设计出异钢种连浇预测模型。第二次发展是 19 世纪 90 年代学者讨论了非等温条对钢液混合的影响。

学者首先研究了中间包钢液在非等温条件下的混合行为,继而研究了钢流中钢液在非等温条件下的混合行为,最后设计了考虑非等温条件的异钢种连浇预测模型,进一步提高了模型的准确性。第三次发展是2010年后大量学者细化了各种因素对交接坯长度的影响,设计了新的成分检测仪器,引入了人工智能研究异钢种连浇过程。

4.2 异钢种连浇方法的局限性

异钢种连浇的研究方法主要包括工业试验、水模型试验和数值模拟。工业试验是研究交接坯最准确的方法。然而,工业试验的取样过程和检测过程比较繁琐,还会破坏铸坯的完整性,导致其无法进入轧制工序。所以很难采用大量工业试验研究异钢种连浇过程。水模型试验是研究异钢种连浇过程最方便的方法,部分学者将盐水假设为溶质元素含量较高的钢种,清水假设为溶质元素含量较低的钢种,这种假设方法忽略了密度的影响,导致模拟结果存在偏差。数值模拟可以全面研究各种因素对交接坯长度的影响。但其计算周期较长,无法实时计算各种生产条件下的异钢种连浇过程。

交接坯判定模型同样各具优缺点。模拟结果拟合模型对所研究连铸机的预测结果较好,但将其推广至其他连铸机时的工作量较大。反应工程学计算模型可以快速预测交接坯,但其需依靠研究人员的工作经验且准确度较差。脉冲激光法检测模型可以检测铸坯表面成分,但无法识别铸坯中心成分。人工智能预测模型需要大量的数据作为训练集,但目前异钢种连浇的数据量较少,无法为人工智能预测模型提供大量的数据作为模型的训练集。

4.3 异钢种连浇的新解决方案

近年来,越来越多的学者关注到交接坯不同位置的元素含量存在差异。这是由于他们的研究只考虑了流动对钢液混合的影响,忽略了凝固过程溶质

再分配现象对交接坯的影响。全长度铸坯的宏观偏析模型^[59]在当前得到了长足的发展,有助于我们研究宏观偏析对交接坯成分的影响。我们针对以上研究方法和预测模型优缺点,规范异钢种连浇过程,并提出一套现阶段较为合理的方案用于实际生产:

1)采用水模型试验确定所研究中间包的最佳液位控制策略和各流之间RTD曲线差异。

2)通过数值模拟方法研究非等温条件和钢液密度对交接坯长度的影响,并考虑钢液凝固过程伴随的宏观偏析现象对交接坯成分的影响。

3)根据模拟结果采用模拟结果拟合模型针对特定连铸机设计专有的异钢种连浇预测模型。

4)在现场应用模拟参数拟合模型后,配备人工智能预测模型,长期收集异钢种连浇数据,继续优化异钢种连浇模型。

5 结语

异钢种连浇技术可以提高企业的生产效率,降低企业的生产成本,成为当前钢铁企业必须具备的生产技能。笔者针对异钢种连浇技术汇总了国内企业的工业试验,采用模拟方法探讨了中间包及钢流的钢液混合现象,列举了当前主流的交接坯判定模型,并提出了当前的解决思路。其中有以下几点需要格外关注,是未来的研究方向之一:

1)通过全长度宏观偏析模型解释交接坯中心成分与表面成分差异较大的现象。

2)开发包含流-固-热-磁和传质的新一代交接坯预测软件,实现交接坯的精准划分。

3)全面建立异钢种连浇的生产制度,实现交接坯长度最小化。

4)收集异钢种连浇的各项数据,训练异钢种连浇人工智能预测模型,为钢铁企业的异钢种连浇技术赋能,提高企业生产效率,降低生产成本。

参考文献

- [1] Tian Zhiling. Development and application of steel product research in central iron and steel institute [C]//Proceedings of the 12th CSM Congress. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2019: 1-2.
(田志凌. 钢铁材料品种开发及其应用进展[C]//第十二届(2019)中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2019: 1-2.)
- [2] Guo Xiaochun, Fu Qiang, Wang Jian, *et al.* Research and practice of increasing continuous casting heats for RH refining aluminum killed steel[J]. *Steelmaking*, 2018, 34(4): 45-49.
(郭晓春, 富强, 王健, 等. 提高RH精炼铝镇静钢连浇炉数的研究及实践[J]. 炼钢, 2018, 34(4): 45-49.)
- [3] Huang Xiaoping, Thomas Brian G. Modeling of steel grade transition in continuous slab casting processes[J]. *Metall. Mater. Trans.*, 1993, 24B: 379-393.
- [4] Huang Xiaoping, Thomas Brian G. Intermixing model of continuous casting during a grade transition[J]. *Metall. Mater. Trans.*, 1996, 27B: 617-632.
- [5] Wang Baosheng, Chen Yuxin, Wang Hao. Practice of steel-grade change after flying tundish in shougang jingtang continuous caster[J]. *Contin. Cast.*, 2013, (3): 1-3.
(王保生, 陈玉鑫, 王皓. 首钢京唐公司连铸机异钢种快换中间包生产实践[J]. 连铸, 2013, (3): 1-3.)

- [6] Li Caixia. Study on composition variation law of steel grade transition during continuous casting[J]. *Wide Heavy Plate*, 2017, 23(3): 12-15.
(李彩霞. 连铸异钢种混浇成分变化规律的研究[J]. *宽厚板*, 2017, 23(3): 12-15.)
- [7] Lu Yunwei, Cui Sulan. The transition duration and the influential factors of compound casting billets[J]. *Steelmaking*, 1995, (4): 30-33.
(陆云威, 崔素兰. 连铸混浇坯的过度时间及影响因素[J]. *炼钢*, 1995, (4): 30-33.)
- [8] Cao Tongyou, Yang Xinquan. Study on interfusion rules of different steel grades during continuous casting[J]. *Res. Iron Steel*, 2014, 42(5): 11-13.
(曹同友, 杨新泉. 异钢种连浇钢水互熔规律的研究[J]. *钢铁研究*, 2014, 42(5): 11-13.)
- [9] Gan Ming, Zhang Tao, Peng Kaiyu, *et al.* Development and application of constant casting speed technology and different grade casting technology in shougang qian'an steel [C]// 2014 China Steelmaking and Continuous Casting Production Technology Conference. Tangshan: The Chinese Society for Metals, 2014: 72-77.
(干明, 张涛, 彭开玉, 等. 首钢迁钢恒拉速、异钢种连浇技术的开发与应用[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: 72-77.)
- [10] Zhang Chuan, Wang Hao, Zhang Yuan, *et al.* Production practice on steel grade transition of continuous casting[J]. *Res. Iron Steel*, 2015, 43(4): 53-56.
(张川, 王皓, 张沅, 等. 连铸机异钢种混合浇铸生产实践[J]. *钢铁研究*, 2015, 43(4): 53-56.)
- [11] Li Dongming, Dong Fang, Fu Yue. Production practice of optimizing different steel grade continuous casting[J]. *Science and Technology of Baotou Steel*, 2016, 42(6): 28-31.
(李东明, 董方, 付岳. 优化异钢种连续浇注的生产实践[J]. *包钢科技*, 2016, 42(6): 28-31.)
- [12] Lü Zhiyong, Zhou Liujian, Shi Yeshu, *et al.* Production practice of casting molten steel with different steel grades[J]. *Science and Technology of Baotou Steel*, 2018, (4): 58-62.
(吕志勇, 周刘建, 史页殊, 等. 异钢种混浇生产实践[J]. *鞍钢技术*, 2018, (4): 58-62.)
- [13] Sui Yafei, Chen Jie, Liu Peng, *et al.* Research and model prediction on composition change of continuous casting intermixing slab[J]. *Contin. Cast.*, 2019, 44(4): 62-67.
(隋亚飞, 陈杰, 刘彭, 等. 连铸混浇坯成分变化规律及模型的研究[J]. *连铸*, 2019, 44(4): 62-67.)
- [14] Yang Limei, Zheng Lining. Production practice of the steel grade transition in continuous casting tundish[J]. *Modern Metallurgy*, 2021, 49(1): 43-46.
(杨丽梅, 郑力宁. 连铸中间包异钢种连浇生产实践[J]. *现代冶金*, 2021, 49(1): 43-46.)
- [15] Siddiqui Md Irfanul Haque, Kim Man-Hoe. Two-phase numerical modeling of grade intermixing in a steelmaking tundish[J]. *Metals*, 2019, 9(1): 1-14.
- [16] Michalek Karel, Gryc Karel, Tkadleckova Markéta, *et al.* Model study of tundish steel intermixing and operational verification[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2012, 57(1): 291-296.
- [17] Siddiqui Md Irfanul Haque, Kim Man Hoe. Optimization of flow control devices to minimize the grade mixing in steelmaking tundish[J]. *J. Mech. Sci. Technol.*, 2018, 32(7): 3213-3221.
- [18] Oro Fernández, Morros Santolaria, Somoano Rodriguez, *et al.* Multiphase modelling of the steel grade transition in a continuous casting tundish [C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting . Vail, Colorado USA: ASME, 2009: 2183-2194.
- [19] Bi Jinghan. Prediction model of intermixing slab location and length in continuous casting grade transition process[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
(毕经汉. 异钢种连浇交接坯位置和长度预测模型[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.)
- [20] Li Tao. Study of intermixing slab length and location in continuous casting grade transition process [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2016.
(李涛. 异钢种连浇交接坯长度和位置的研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2016.)
- [21] Zhang Jianjun, Peng Zhugang, Wang Chunfeng, *et al.* Research on continuous casting grades transition process by hydraulic model of CSP 45 t single strand tundish[J]. *Steelmaking*, 2017, 33(4): 19-22.
(张剑君, 彭著刚, 王春峰, 等. 薄板坯单流中间包混浇水力模型试验研究[J]. *炼钢*, 2017, 33(4): 19-22.)
- [22] Branislav Bul'ko, Marek Molnár, Peter Demeter, *et al.* Study of the influence of intermix conditions on steel cleanliness[J]. *Metals*, 2018, 8(10): 852-860.
- [23] Liu Chao. Study on multiphase flow and mixing during grade change process of a five-strand bloom tundish[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
(刘超. 五流中间包异钢种连浇过程多相流及混钢行为研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.)
- [24] Damle Chandrashekha, Sahai Yogeshwa. A criterion for water modeling of non-isothermal melt flows in continuous casting tundishes[J]. *ISIJ Int.*, 1996, 36(6): 681-689.
- [25] Sinha A K, Vassilicos A. Physical modelling of thermal effects on steel flow and mixing in tundish[J]. *Ironmaking Steelmaking*, 1998, 25(5): 387-393.
- [26] Amorim Laudinei L C, Silva Carlos A, Resende Alexandre D, *et al.* A study of intermix in a six-strand billet caster[J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2018, 49A: 6308-6324.
- [27] Chatopadhyay Kinnor, Isac Mihaela, Guthrie Roderick Ian Lawrence. Modelling of non-isothermal melt flows in a four strand felta shaped billet caster tundish validated by water model experiments[J]. *ISIJ Int.*, 2012, 52(11): 2026-2035.
- [28] Cwudziński Adam. Physical and mathematical simulation of liquid steel mixing zone in one strand continuous casting tundish[J]. *Int. J. Cast Metal. Res.*, 2016, 30(1): 50-60.
- [29] Chen Huiqing Sarah, Pehlke Robert D. Mathematical modeling of tundish operation and flow control to reduce transition slabs[J]. *Metall. Mater. Trans.*, 1996, 27B: 745-756.
- [30] Guo Chunmu, Yu Fan, Zhang Xinxin. Numerical simulation of steel flow and mixing during grade transition casting[J]. *Chian Metall.*, 2006, 16(1): 35-38.
(郭春牧, 于帆, 张欣欣. 异钢种连浇过程中钢液流动与混合的数值模拟[J]. *中国冶金*, 2006, 16(1): 35-38.)
- [31] Kant S, Jha P K, Kumar P. Investigation of effect of dam on intermixing during ladle changeover in six strand billet caster tundish[J]. *Ironmaking Steelmaking*, 2011, 38(5): 391-397.

- [32] Kumar Rajneesh, Siddiqui Md Irfanul Haque, Jha Pradeep Kumar. Numerical investigations on the use of flow modifiers in multi-strand continuous casting tundish using RTD curves analysis [C]// Proceedings of International Conference on Smart Technologies for Mechanical Engineering, 2013: 603–612.
- [33] Agarwal Rohit, Singh Mrityunjay K, Kumar Ram Bachchan, *et al.* Extensive analysis of multi strand billet caster tundish using numerical technique[J]. *World Journal of Mechanics*, 2019, 9: 29-51.
- [34] Kumar Rajneesh, Maurya Ambrish, Siddiqui Md Irfanul Haque, *et al.* Some studies in different shapes of tundish-intermixing and flow behaviour [C]// Department of Industrial and Production Engineering 14th International Conference on Production and Industrial Engineering. Jalandhar, India: CPIE, 2016: 603–610.
- [35] Siddiqui Md Irfanul Haque, Jha Pradeep Kumar. Effect of inflow rate variation on intermixing in a steelmaking tundish during ladle change-over[J]. *Steel Res. Int.*, 2016, 87(6): 733-744.
- [36] Muralikrishna A, Muralikrishna S, Dipak Mazumdar. Modeling and measurements of intermixing time in a water model of a four strand steelmaking tundish system[J]. *Trans. Indian Inst. Met.*, 2013, 66(3): 281-295.
- [37] Meng Na, Yu Jia, Liu Lan, *et al.* Numerical simulation of molten steel in tundish during continuous casting grade transition[J]. *Heavy Machinery*, 2012, (2): 20-25.
(孟娜, 余嘉, 刘岚, 等. 连铸异钢种连浇中间包内钢液流动的数值模拟[J]. *重型机械*, 2012, (2): 20-25.)
- [38] Zorzut M, Vecchiet F, Kapaj N, *et al.* Tundish flow optimization and steel grade change prediction[J]. *Berg Huettenmaenn Monatsh*, 2007, 152: 355-360.
- [39] Wang Yufeng, Zhang Lifeng. Transient fluid flow phenomena during continuous casting: part II—cast speed change, temperature fluctuation, and steel grade mixing[J]. *ISIJ Int.*, 2010, 50(12): 1783-1791.
- [40] Thomas Brian G. Modeling study of intermixing in tundish and strand during a continuous-casting grade transition[J]. *Iron and Steelmaker*, 1997, 24(12): 83-96.
- [41] Thomas Brian G. The importance of computational models for further improvements of the continuous casting process [C]// Voest Alpine Conference on Continuous Casting. Linz, Austria: Semantic Scholar, 2001: 1–10.
- [42] Lan X K, Khodadadi J M. Liquid steel flow, heat transfer and solidification in mold of continuous casters during grade transition[J]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2001, 44: 3431-3442.
- [43] Michalek K, Gryc K, Tkadleckova M, *et al.* Type of submerged entry nozzle vs. Concentration profiles in the intermixed zone of round blooms with a diameter of 525 mm[J]. *Materials and Technology*, 2012, 46(6): 581-587.
- [44] Jeong Myunggeun, Choi Changyoung, Ha Man Yeong, *et al.* Numerical simulation of continuous casting process of different steel grades considering solidification and mixing of different steel grades[J]. *Met. Mater. Int.*, 2015, 21(2): 303-310.
- [45] Chen Zhiping. Study on the control of continuous casting slab quality under unsteady casting condition[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
(陈志平. 非稳态连铸条件下连铸板坯质量控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.)
- [46] Sun Zengxiao. Water model experiment of steel grade transition in continuous casting process[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2010.
(孙增晓. 异钢种连浇过程的水模型实验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2010.)
- [47] Li Baokuan, Tsukihashi Fumitaka. Effect of static magnetic field application on the mass transfer in sequence slab continuous casting process[J]. *ISIJ Int.*, 2001, 41(8): 844-849.
- [48] Ahn J H, Yoon J K, Lee J E. Analysis of mixed grade transition in continuous thin slab casting with EMBR[J]. *Met. Mater. Int.*, 2002, 8(3): 271-281.
- [49] Li Yugang, Dong Jingang, Li Gang, *et al.* Prediction model of slab at junction in continuous casting of dissimilar steel[J]. *J. Chongqing Univ.*, 2006, 29(8): 119-122.
(李玉刚, 董金刚, 李刚, 等. 异钢种连浇过程中的交接部铸坯预测模型[J]. *重庆大学学报*, 2006, 29(8): 119-122.)
- [50] Hou Jilin. Study on slab judgement of multi heats continuous casting steel mixing zone[J]. *Science and Technology of Baotou Steel*, 2000, 26(1): 43-46.
(侯基林. 多炉连浇混钢区铸坯判定的研究[J]. *包钢科技*, 2000, 26(1): 43-46.)
- [51] Goldschmit Marcela B, Ferro Sergio P, Walter Guillermo F, *et al.* Numerical model for the minimization of intermixed round bars in a four line continuous caster[J]. *Metall. Mater. Trans.*, 2001, 32B: 537-546.
- [52] Cho Myung Jong, Kim In Cheol. Simple tundish mixing model of continuous casting during a grade transition[J]. *ISIJ Int.*, 2006, 46(10): 1416-1420.
- [53] Cho Myung Jong, Kim Sang Joon. A practical model for predicting intermixed zone during grade transition[J]. *ISIJ Int.*, 2010, 50(8): 1175-1179.
- [54] Alizadeh Mehdi, Edris Hossein, Pishavar Ahmad Reza. Behavior of mixed grade during the grade transition for different conditions in the slab continuous casting[J]. *ISIJ Int.*, 2008, 48(1): 28-37.
- [55] Braga Bernardo Martins, Tavares Roberto Parreiras. Additional information on “Simple tundish mixing model of continuous casting during a grade transition” by Cho and Kim[J]. *ISIJ Int.*, 2018, 58(6): 1178-1180.
- [56] Ruiz J, Delgado T, Cabalin L M, *et al.* At-line monitoring of continuous casting sequences of steel using discriminant function analysis and dual-pulse laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2017, 32: 1119-1128.
- [57] Cabalin L M, Delgado T, Ruiz J, *et al.* Stand-off laser-induced breakdown spectroscopy for steel-grade intermix detection in sequence casting operations. At-line monitoring of temporal evolution versus predicted mathematical model[J]. *Spectrochim. Acta B*, 2018, 146: 93-100.
- [58] Zhao Liping, Dou Rushan, Yin Junjun, *et al.* Intelligent prediction method of quality for continuous casting process [C]//2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC 2016). Xian: IMCEC, 2016: 1761–1764.
- [59] Li Yaoguang. Numerical study on macroscopic transport phenomena and center segregation for continuous casting process[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
(李曜光. 连铸过程宏观传输现象及中心偏析的模拟研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.)