

连铸参数对中间包内控流元件冶金性能的影响

景财良¹ 王新华¹ 李林平¹ 王万军¹ 龚志翔²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 马鞍山钢铁有限公司技术中心,马鞍山 243000)

摘要 根据相似原理,以浇铸Φ380 mm铸坯的28 t 3流T型中间包为原型,通过实验相似比 $\lambda = 1:2$ 水模型,研究了拉速0.3~0.9 m/min、液位600~1 200 mm连铸条件下,控流元件对中间包内流场特性的影响。结果表明,当实际生产的中间包液位为500 mm左右时,拉速 < 0.4 m/min时,控流元件改善其流场的作用不明显,不需加入控流元件;当拉速 ≥ 0.4 m/min和 < 0.7 m/min时,可选用带挡墙结构的中间包;当拉速 ≥ 0.7 m/min,可考虑挡墙加湍流抑制器的结构,以优化中间包内流场特性。通过对中间包内流场的分析得出,设置控流元件时,应尽量降低注流混乱度并使钢水湍动能尽可能多的消耗在浇铸区。

关键词 连铸参数 3流T型中间包 控流元件 冶金性能

Effect of Casting Parameters on Metallurgical Function of Flow Control Devices in Tundish

Jing Cailiang¹, Wang Xinhua¹, Li Linping¹, Wang Wanjun¹ and Gong Zhixiang²

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Technology Center, Ma'anshan Iron and Steel Co Ltd, Ma'anshan 243000)

Abstract Based on similarity theory, according to a 28 t prototype 3-strand T-type tundish for casting Φ380 mm bloom, the effect of flow control devices on characteristics of flow field in tundish in casting conditions of casting speed-0.3~0.9 m/min and liquid level-600~1 200 mm has been studied by using experimental similarity ratio $\lambda = 1:2$ water model. Results show that in condition of tundish liquid level about 500 mm in commercial production status, with casting speed < 0.4 m/min, the effect of flow control devices on flow field characteristics is not obvious i. e. it is not need to locate flow control devices; with casting speed ≥ 0.4 m/min and < 0.7 m/min, it is available to using tundish located weirs; and with casting speed ≥ 0.7 m/min, the structure of weirs with turbulent inhibitor is favourable to be used to optimize the characteristics of flow field in tundish. It is obtained by analysis on flow field in tundish that to locate flow control devices the disorder degree of pouring flow should be decreased as far as possible and the turbulent energy of liquid flow is depleted as much as possible in pouring region.

Material Index Casting Parameters, 3-strand T-type Tundish, Flow Control Device, Metallurgical Function

目前,中间包已经成为提高连铸坯质量的关键冶金反应器。通过在中间包内设置各种控流元件(挡墙、坝、堰、过滤器等)来优化中间包流场特性,可以达到促进夹杂物上浮、均匀钢水温度等效果,已在大量文献中得到肯定^[1-6]。但是这致使了很多钢厂盲目在中间包内增设控流元件,有时非但起不到优化钢水质量的作用,反而还增大了对耐火材料的侵蚀和卷渣程度,其结果适得其反。Walf认为上下挡墙对去除夹杂物的效果并不适用于各种容量的中间包^[7];Heaslip提出缓冲板安装的位置不合适的话,会对流股特性起到反效果^[8];德国马普斯所与技术中心研究表明,中间包挡墙促进夹杂上浮等作用不明显,建议无挡墙中间包技术^[9]。造成此现象的主要原因是一般文献都是针对某些特定连铸参数条件下所做的研究,由此得出的结论是否适用于其他连铸参数还有待考证。

以钢厂3流T型中间包为原型,通过研究3种典型中间包结构(不带内控流元件的空中间包、带挡墙、带挡墙加湍流抑制器的中间包)在不同拉速和不同液位高度下的流场特性,对中间包控流元件的冶金效果做出更为准确和客观的评价。并给出中间包设置控流元件的原则,为现场对如何优化中间包结构提供了理论依据。

1 实验原理与装置

根据相似原理,以钢厂公称容量为28 t的3流T型中间包为原型,在几何相似和Froude准数相等的基础上^[10],建立相似比 $\lambda = 1:2$ 的物理模型,则:

$$\lambda = l_m/l_p; Fr_m = Fr_p \quad (1)$$

式中: m 、 p -表示模型和原型。

由(1)式可得模型与原型之间尺寸 l 、流速 u 与流量 Q 的对应关系:

$$l_m = \lambda \cdot l_p; u_m = \lambda^{0.5} \cdot u_p; Q_m = \lambda^{0.5} \cdot Q_p \quad (2)$$

根据式(2),制作物理模型并确定实验参数,如表1所示。

实验设计了3种典型T型中间包结构模型,分别为空中间包、带挡墙(两中孔 $h = 250$ mm、 $\Phi 30$ mm、向上向外角度 40° 、两侧孔高 $h = 200$ mm、 $\Phi 45$ mm、向上角度 37°)、挡墙 + 湍流抑制器,其俯视图如图1所示。

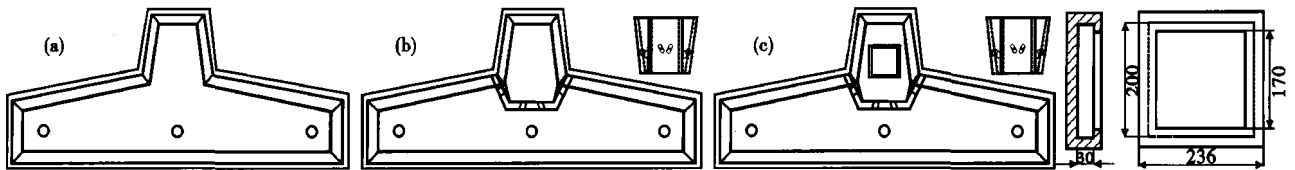


图1 试验方案示意图:(a)空中间包;(b)带挡墙;(c)挡墙+湍流抑制器

Fig. 1 Schematics of test scheme: tundish without flow control devices (a); with weir (b); with weir and turbulent inhibitor (c)

当按照表1中某实验参数设置好并待其流场稳定后,采用“刺激-响应”实验方法,将200 mL饱和NaCl溶液做示踪剂在中间包长水口随管以脉冲方式加入,同时在3个出口处用“电导率仪-DJ800系统-计算机”测定水溶液电导率随时间的变化并绘制RTD曲线,并按式(3)求得平均停留时间 \bar{t} 与死区比例 V_d 。

$$\bar{t}_i = \frac{\sum t C_i(t)}{\sum C_i(t)}; \bar{t} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \bar{t}_i; V_d = 1 - \frac{3 \cdot \bar{t} \cdot Q_m}{V_m} \quad (3)$$

式中: i -各个水口对应参数; \bar{t} -时间/min; Q_m -实验流量(见表1)。

中间包内流场采用染色剂(红墨水配黑墨水)示踪与气泡示踪方法显示,并用数码相机拍摄中间包内流体的流动过程。

2 实验结果与讨论

2.1 拉速变化的影响

实验研究了液位在500 mm,拉速在0.3~0.9 m/min变化时,不同中间包结构对钢水流动特性的影响。测量得到的数据按照式(3)处理后得到平均停留时间、死区比例与拉速的关系,如图2所示。

由图2可以看出,(1)同一拉速下,空中间包平均停留时间最短,死区比例最大。挡墙加湍

表1 原型与模型参数的对比

Table 1 Contrast between prototype and model parameters

现场拉速 v_p / ($m \cdot min^{-1}$)	实验流量 Q_m / ($L \cdot min^{-1}$)	现场液位 H_p / mm	实验液位 H_m / mm
0.3	6	600	300
0.5	10	800	400
0.7	14	1 000	500
0.9	18	1 200	600

注:1、原型底面尺寸4 100 mm×500 mm、长水口内径 $\Phi 120$ mm、浇铸断面 $\Phi 380$ mm;2、表中流量为单流流量。

流抑制器的中间包结构平均停留时间最长,死区比例最小;(2)拉速较低时,3种结构的中间包平均停留时间与死区比例比较接近,说明此时控流元件并未起到明显改善流场特性的作用,反而还可能增加了耐火材料的侵蚀与卷入几率,对铸坯质量起到负面影响,不宜使用;(3)随着拉速的提高,3种结构的中间包平均停留时间均有缩短的趋势,从死区比例的变化可以明显看到,拉速越高,3种中间包结构的效果差异越明显。说明控流元件可增加中间包流场特性的稳定性,并在较高拉速条件下,才能发挥明显优化流场的作用。

通过染色剂示踪观察分析,注流股能量在浇铸区的耗散程度不同是造成各种控流元件对中间包流动特性效果不同的根本原因。图3为拉速在0.5 m/min,3种中间包结构下长水口射流股刚好流出浇铸区时的流场示踪形貌图。由图3可以看出,空中

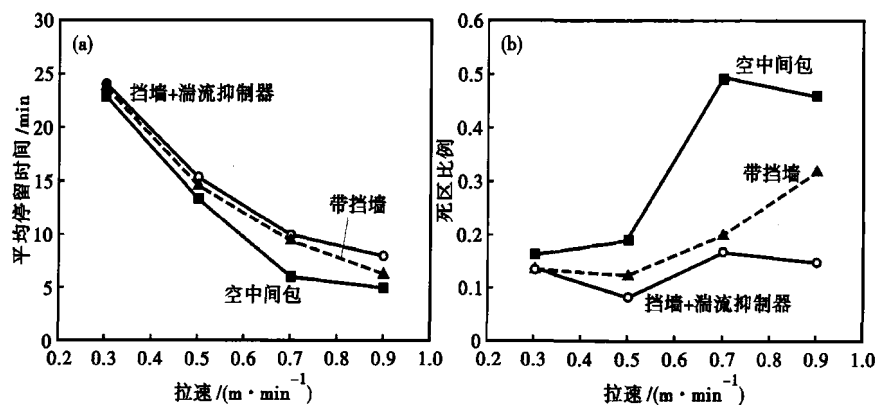


图2 拉速对平均停留时间(a)和死区比例(b)的影响

Fig. 2 Effect of casting speed on average residence time (a) and dead volume fraction (b)

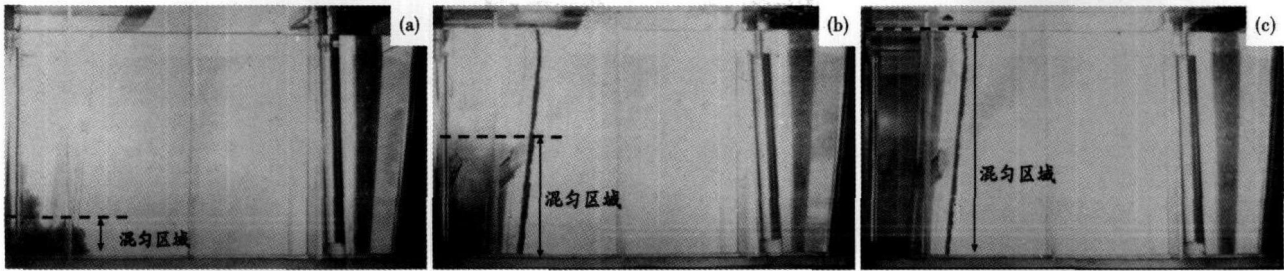


图3 染色剂流场示踪:(a)空中间包;(b)带挡墙;(c)挡墙+湍流抑制器

Fig. 3 Tracer dispersion for flow field in tundish without flow control devices (a); with weir (b); with weir and turbulent inhibitor (c)

间包条件下,高能量流股从长水口注入到浇铸区,基本没有经过耗散与混匀就流出浇铸区(图3a),此时流股速度还较快,容易直接流出各水口而造成短路流恶化中间包流动特性。而由于挡墙的存在,注流股有一定程度混匀和能量的耗散后才通过导流孔流出浇铸区(图3b)。此时,流股流速由于能量在浇铸区的衰减而降低,进而增加了停留时间,降低了短路流,优化了流场特性。而加入湍流抑制器时,注流股基本混合均匀后才流出浇铸区,使得流场特性优化的效果更为明显(图3c)。

2.2 液位变化的影响

实验研究了拉速在0.5 m/min,液位在300~600 mm变化时,不同结构中间包的钢水流动特性,测量数据按照式(3)处理后得到平均停留时间、死区比例与液位深度的关系,如图4所示。

由图4可以看出,(1)同一液位高度下,空中间包停留时间最短,死区比例最大。挡墙加湍流抑制器的中间包结构的效果相反;(2)由死区比例的变化可以看出,随着液位越低,控流装置对改善中间包的冶金作用越明显。对于本实验研究的中间包而言,当液位高度 ≥ 500 mm时,可认为挡墙或湍流抑制器基本没有对流场起到改善的作用。而在液位高度 < 500 mm时,则认为加入挡墙或湍流抑制器是必要的。由此可见,采用大容积的中间包浇铸,其本身既有较强的对夹杂物的去除和连铸过程稳定性控制能力,不必盲目的增设控流元件。而对于中小容积的中间包而言,其本身冶金效果较差,只能通过加入控流元件来改善流场特性,进而提高钢水质量。

通过对浇铸区流场的观察分析,不同液位高度对流场特性的影响是注流区混乱区体积大小的不

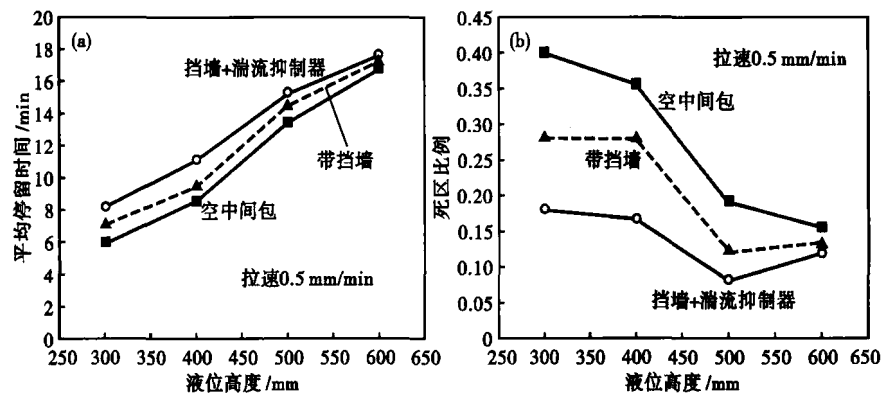


图4 液位高度对平均停留时间(a)和死区比例(b)的影响

Fig. 4 Effect of level of liquid in tundish on average residence time (a) and dead volume fraction (b)

同,同样可理解为注流股能量在浇铸区的耗散程度不同而造成,这与拉速对流场影响的本质是相同的。图5为液位高度分别在300 mm和500 mm下,注流区的流场特征图。从图5可以看出,液位较低且没有湍流抑制器时,注流区中长水口射流混乱区域体积越大(图5a),这样高能量流股就有机会提前冲出浇铸区,造成短路流。而增设湍流抑制器后,可明显降低长水口射流混乱区域体积(图5c),使流股湍动能尽量多的耗散在注流区。而液位较高时,有无湍流抑制器的效果区别减小(图5b,d),说明湍流抑制器是增强中小型中间包冶金性能较好的选择,这与前面的分析相一致。

2.3 控流元件的设置思路

控流元件虽然可以优化中间包的流场进而提升其冶金性能,但是盲目地加入非但不能达到优化流场的效果,还增大了钢液对耐火材料的侵蚀和卷渣几率,对铸坯质量起到负面效果。另外由于现场环境与操作水平的差异,不同厂家对相同的控流元件可能有不同的评价。

通过对连铸参数的研究并分析了流场特性,对设置控流元件提出两点思路:(1)对于大容积、较低拉速生产的中间包而言,如非特殊需要,尽量不增设

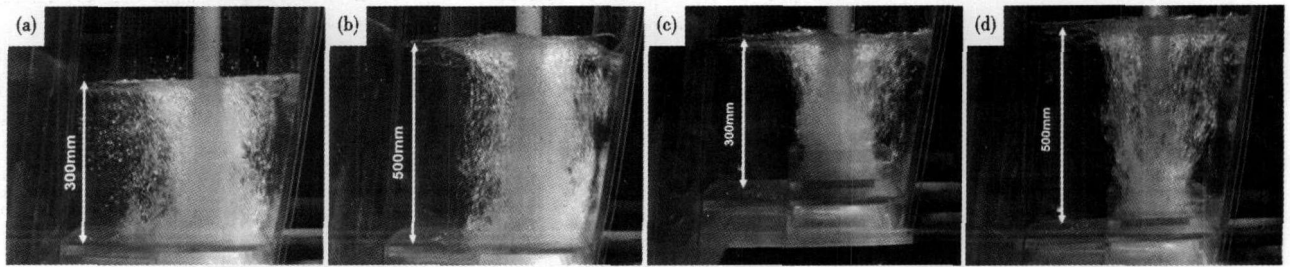


图 5 不同液位高度下湍流抑制器对浇铸区的影响:(a)(b)无湍流抑制器;(c)(d)有湍流抑制器

Fig. 5 Effect of turbulence inhibitor on pouring region at different level of liquid in tundish: (a)(b) without turbulence inhibitor; (c)(d) with turbulence inhibitor

控流元件;(2)如需增设控流元件时,应以尽量降低注流混乱度并使钢水湍动能尽可能多的消耗在浇铸区为原则。就本实验可以认为,液位高度在 500 mm 左右时,当拉速 $v < 0.4$ m/min,不需加入任何控流元件;当拉速 0.4 m/min $\leq v < 0.7$ m/min 时,可选带挡墙结构的中间包;当拉速 $v \geq 0.7$ m/min 时,才可考虑挡墙加湍流抑制器的结构。另外液位高度若增高至 500 mm 以上时,可以采用空中间包操作。

3 结论

(1)拉速较低与液位较高时,中间包本身有较好的冶金性能,此时控流元件并未起到明显改善流

场特性的作用,反而能增加了耐火材料的侵蚀与卷入几率,对铸坯质量起到负面影响,不宜使用;反之,随着拉速的提高和液位的降低,控流元件才逐渐发挥其明显优化流场的作用。所以对于中小型中间包或高拉速生产而言,设置控流装置才是有必要的。

(2)拉速与液位高度对中间包流场特性的影响本质相同,均是注流股能量在浇铸区的耗散程度不同而引起的,由此可提出设置控流元件的原则,应以尽量降低注流混乱度并使钢水湍动能尽可能多的消耗在浇铸区。

国家重点基础发展计划资助(2010CB630806)

参考文献

- 冯捷,唐德池,包燕平,等.控流装置对板坯中间包流场优化的影响.特殊钢,2010,31(2):17
- 郑淑国,朱苗勇,王颖.六流方坯连铸中间包结构优化水模实验.钢铁研究学报,2008,20(11):11
- Liu Song-xia, Yang Xue-min, Du Lin. Hydrodynamic and Mathematical Simulations of Flow Field and Temperature Profile in an Asymmetrical T-type Single-strand Continuous Casting Tundish. ISIJ International, 2008, 48(12): 1712
- 缪春锋,康建国,吕宪雨,等.T型中间包过滤器应用效果研究.中国冶金,2009,19(10):19
- Jha P K, Rao P S, Dewan A. Effect of Height and Position of Dams on Inclusion Removal in a Six Strand Tundish. ISIJ International, 2008, 48(2): 154
- 陈伟鹏,任雁秋,魏祥瑞,等.非对称五流圆坯连铸中间包水模实验研究.炼钢,2007,23(2):41
- Walf M M, Slab Caster Tundish Configuration and Operationa Review. 79th Steelmaking Conference Proceedings. Pittsburgh: ISS, 1996: 367
- Heaslip L J, Schahe J. Physincal Modeling and Visualization of Liquit Steel Flow Behavior during Continuous Casting. Iron and Steelmaker, 1999(1):33
- 苏天森.中国金属学会炼钢考察团赴欧考察报告.炼钢,2003,19(5):1
- Wei Z Y, Bao Y P, Liu J H. Orthogonal Analysis of Water Model Study on the Optimization of Flow Control Devices in a Six-strand Tundish. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 14(2): 118

景财良(1985-),博士研究生,2006年北京科技大学本科毕业,连铸坯质量和热处理研究。

收稿日期:2010-07-03

下 期 要 目

低碳低硅铝镇静钢 LF 顶渣硫分配比预报模型	孙彦辉等
中厚板折叠缺陷影响因素的有限元模拟分析	张春林等
LF 合金加料及终点预测模型的研究	罗仁辉等
120 t LF 钢水温度预报模型的开发	肖超平等
开轧温度对 42CrMo4 钢轧制动态组织变化影响的有限元模拟	洪慧平等
150 t VD/VOD 超纯铁素体不锈钢的开发	何立波等
日本取向电工钢生产工艺最新研发进展	齐殿威等