



## 中间包通道外展角度对感应加热磁场的影响

刘博文, 赵巍

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

**摘要:** 为优化中间包感应加热系统, 研究通道外展角度对电磁场分布的影响规律。以某钢厂二流大水口间距 (5 550 mm) 中间包为对象, 建立三维电磁场数学模型, 模拟了通道外展角度在  $2^{\circ}$ ~ $10^{\circ}$  范围内变化时, 磁感应强度、感应电流密度及焦耳热的分布特性。计算结果表明, 在相同加热功率下, 随着外展角度增大, 通道几何位置相对于线圈发生偏移, 导致磁感应强度、电流密度与焦耳热均呈下降趋势, 且此衰减在通道出口区域最为显著, 表明磁场能量损失主要集中于通道后半段。磁场在通道中心截面上呈稳定的偏心分布, 靠近线圈侧区域的电磁参数更高。综合分析确定,  $2^{\circ}$  外展角为最佳设计参数, 此角度下近线圈侧磁感应强度可达到 0.188 T, 整体感应电流密度均高于  $1.70 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>。因此, 在实际工程设计中, 推荐优先采用  $2^{\circ}$  或邻近的小外展角度, 以最大化电磁耦合效率, 提升加热性能。

**关键词:** 中间包; 感应加热; 通道角度; 电磁场; 数值模拟

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.N260012 **中图分类号:**TF777

## Tundish Channel Abduction Angle on Induction Heating Effect of Magnetic Field

Liu Bowen, Zhao Wei

(School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

**Abstract:** In order to optimize the tundish induction heating system, the influence of channel abduction angle on the distribution of electromagnetic field was studied. A three-dimensional electromagnetic field mathematical model was established to simulate the distribution characteristics of magnetic induction intensity, induced current density and Joule heat when the channel abduction angle changes in the range of  $2^{\circ}$  to  $10^{\circ}$ , taking a two-strand tundish with large nozzle spacing (5 550 mm) in a steel plant as the object. The calculation results show that under the same heating power, as the abduction angle increases, the geometric position of the channel shifts relative to the coil, resulting in a downward trend in magnetic induction intensity, current density and Joule heat, and this attenuation is most significant in the channel outlet area, indicating that the magnetic field energy loss is mainly concentrated in the second half of the channel. The magnetic field shows a stable eccentric distribution on the central section of the channel, and the electromagnetic parameters near the coil side are higher. Through comprehensive analysis, it is determined that the  $2^{\circ}$  abduction angle is the best design parameter. At this angle, the magnetic induction intensity at the near coil side can reach 0.188 T, and the overall induced current density is higher than  $1.70 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>. Therefore, in practical engineering design, it is recommended to use  $2^{\circ}$  or adjacent small outreach angles to maximize electromagnetic coupling efficiency and improve heating performance.

**Key Words:** Tundish; Induction Heating; Angle of Channel; Electromagnetic Field; Numerical Simulation

在钢铁连铸生产中, 中间包是位于钢包与结晶器之间的关键热工设备<sup>[1]</sup>, 保障钢水稳定流动与均衡分配, 确保连铸生产的连续稳定, 是获取高质量连铸坯的承上启下的关键环节<sup>[2-5]</sup>。在实际生产中, 由于开浇阶段、钢包更换等环节会造成较大温降, 为实现恒温和低过热度浇注, 往往采取加热手段来补偿钢液热量损失<sup>[6-8]</sup>。现有技术中一般采用等离子体加热和感应加热方式<sup>[9-10]</sup>, 其中通道式感应加

热因热效率高、加热均匀且有利于夹杂物上浮等优点而受到广泛关注<sup>[10-13]</sup>。张晗等<sup>[14]</sup>对双通道感应加热中间包进行了数值模拟, 结果表明, 与无加热工况相比, 感应加热能更好地优化中间包内钢液的流场与温度场分布。林佩池<sup>[15]</sup>进行了间歇式感应加热研究, 发现不同模式的间歇感应加热形成的流场特征不同, 而过短的高频间歇模式不利于形成理想的流动形态。

作者简介: 刘博文(2000—), 女, 硕士; **E-mail:**1832135660@qq.com; **收稿日期:**2026-01-23

通信作者: 赵巍(1968—), 女, 博士, 教授; **E-mail:**hxliu0490@sina.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

随着电磁感应加热技术日趋成熟,其内部多场耦合规律被广泛研究。路遥<sup>[16]</sup>通过有限元分析方法研究了电磁感应加热中间包磁、热、流宏观传输行为,结果表明,磁感应强度与感应加热功率存在线性关系。杨斌等<sup>[17]</sup>模拟研究了加热功率对中间包冶金效果的影响,发现功率设置与钢液流动形态、温度分布共同决定了加热效率。

在感应加热中间包系统中,通道几何结构特别是通道角度的设置对电磁场分布、钢液流动及传热行为具有决定性影响。段鹏飞等<sup>[18]</sup>设计了3种不同通道外展角度的六流板坯中间包的数学模型,研究了通道外展角度对钢液流动行为的影响,结果表明角度越大时,死区比例上升,短路流现象加剧。霍佳等<sup>[19]</sup>提出一种新型的带角度的变径分口式通道结构,指出该结构配合感应加热能够强化钢液在中间包内的物质与能量交换,提升流动与温度均匀性。Chen等<sup>[20]</sup>人通过数值模拟研究发现,采用四通道的感应加热中间包,相比传统双通道结构,能显著降低钢液对壁面的冲击,并大幅提高多流间的流动与温度均匀性,同时具有更高的能量利用效率。

大水口间距的二流中间包主要用于大截面尺寸铸坯的连铸。为了满足大铸坯的拉速和坯壳凝固要求,需要低过热度且均匀的温度场,以及合理的流场,这对感应加热的效率、均匀性及稳定性要求更高。针对大水口间距的二流中间包建立数学模型,模拟计算感应加热通道外展角度变化对磁场分布的影响,分析通道内磁感应强度、感应电流密度及焦耳热的分布规律,为实际生产中该类中间包的优化设计提供理论依据。

## 1 模型建立

### 1.1 中间包模型

根据某钢厂提供的实际大圆坯二流中间包参数,利用SolidWorks构建相应的三维模型,如图1所示。中间包由T形注入室与分配室两部分组成,二

者通过一对带有外展角度的通道相连。感应加热装置安装在两处通道外围,主要由线圈与铁芯构成,可在钢液流经通道时对其进行加热。通道呈外展八字形,外展角度设为 $\angle\alpha$ ,当 $\angle\alpha$ 为 $0^\circ$ 时通道长度为1.2 m,本研究中 $\angle\alpha$ 值为 $2^\circ\sim 10^\circ$ 。图2为该中间包三视图,中间包容量为38 t,两水口中心距为5 550 mm,中间包最大长度为7 220 mm,最大宽度为2 905 mm,最小宽度为893 mm,通道内径为150 mm,其余参数见表1。

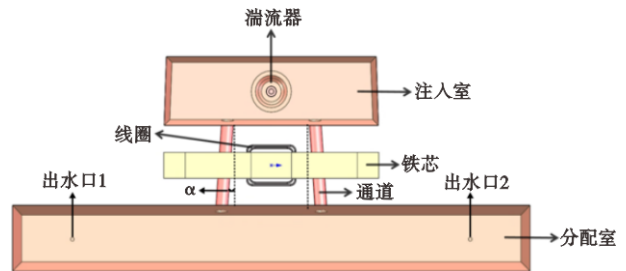


图1 中间包几何模型  
Fig. 1 Tundish geometric model

表1 感应加热中间包的几何参数与工艺参数  
Table 1 Geometric and process parameters of the induction heating tundish

参数	数值
浇注区液面高度/mm	900
通道数/个	2
铸流数/流	2
通道向下外展角度/ $^\circ$	4
通道外展角度/ $^\circ$	2~10
通道内径/mm	150
水口间距/mm	2 000
铸流间距/mm	5 550

### 1.2 数学模型

#### 1.2.1 基本假设

为简化计算、保障模拟可行性,作出如下基本假设:

- 1) 计算中材料的相对磁导率为常数,且各向

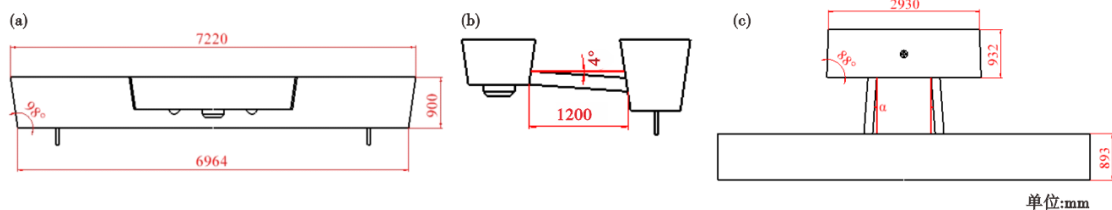


图2 中间包三视图:(a)主视图,(b)侧视图,(c)俯视图  
Fig. 2 Tundish three views : ( a ) main view , ( b ) side view , ( c ) top view

同性。

2)空气为绝缘材质,电导率为0。

3)忽略钢液流动时对磁场的影响。

### 1.2.2 基本方程

法拉第电磁感应定律:

$$\nabla \times \vec{B} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

安培环路定律:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

高斯磁通定律:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

高斯电通定律:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \rho \quad (4)$$

由麦克斯韦方程组推导可得到磁场的计算方程:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu\sigma\vec{E} + \mu\varepsilon\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (5)$$

式中, $\vec{E}$ 为电场强度矢量,V/m; $\vec{B}$ 为磁感应强度矢量,T; $\vec{H}$ 为磁场强度矢量,A/m; $\vec{J}$ 为电流密度矢量,A/m<sup>2</sup>; $\vec{D}$ 为电位移矢量,C/m<sup>2</sup>; $\rho$ 为电荷密度,C/m<sup>3</sup>; $\mu$ 为磁导率,H/m; $\varepsilon$ 为介电常数,F/m。

## 2 计算条件

### 2.1 初始条件及边界条件

在磁场计算中,交流电被加载在带铁芯的感应器上,感应器上的线圈由多匝绕制而成,以此作为原边,两个通道通过注入室与分配室连成的钢水闭合回路作为次级线圈。原边线圈通入电流的频率为50 Hz,其余参数见表2。

表2 数值模拟参数

Table 2 Numerical simulation parameters

参数	数值
空气相对磁导率/(H·m <sup>-1</sup> )	1
钢液导热系数/[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	52.535
钢液相对磁导率/(H·m <sup>-1</sup> )	1
线圈相对磁导率/(H·m <sup>-1</sup> )	1
钢液电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	714 000
铁芯相对磁导率/(H·m <sup>-1</sup> )	7 000
激励电流/A	772

### 2.2 网格划分

中间包采用四面体网格划分,如图3所示。同时,为提高计算的精确度,对通道、注入室和分配室

连接的地方进行了局部加密。网格数量和网格质量会直接影响计算的速度和准确性:网格数量越多,质量越好,为了降低网格尺寸对模拟结果的影响,需要对网格进行无关性验证。分别划分数量为10.2、30.8、51.6、72.1、106.5、131.1万的电磁场计算网格,对以上6种网格数量的中间包设置相同的初始条件和计算参数,监控左侧通道中心随机四个点的磁感应强度B,观察网格数量对4个点温度的影响,结果如图4所示。当网格数量达到50万后,监测点的磁感应强度波动幅度很小,综合考虑选用51.6万网格进行计算。

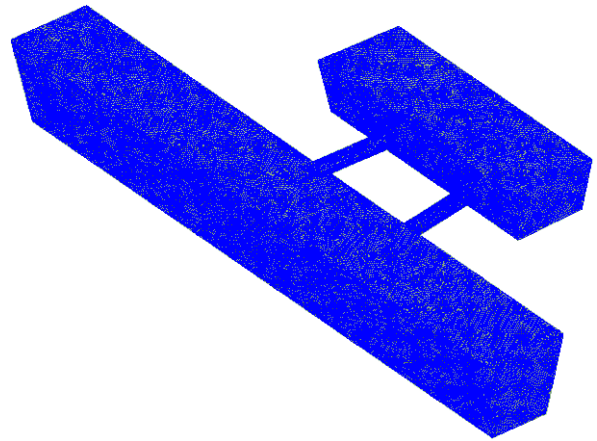


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation

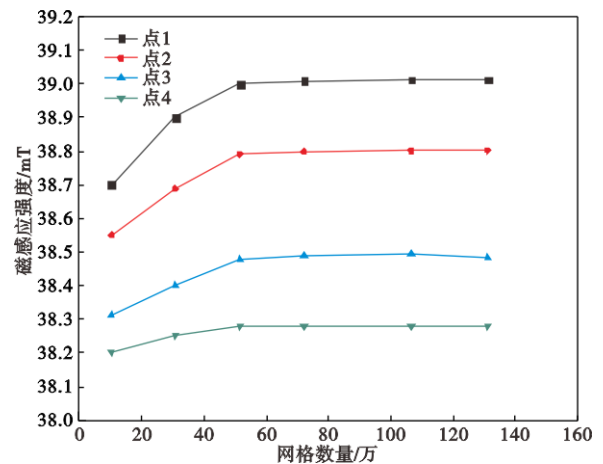


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

### 2.3 关键面和关键线选取

为研究不同通道角度中间包在相同工况下的磁场分布情况选取了若干关键线与关键面进行对比分析。如图5所示,其中,关键面1为距离通道入

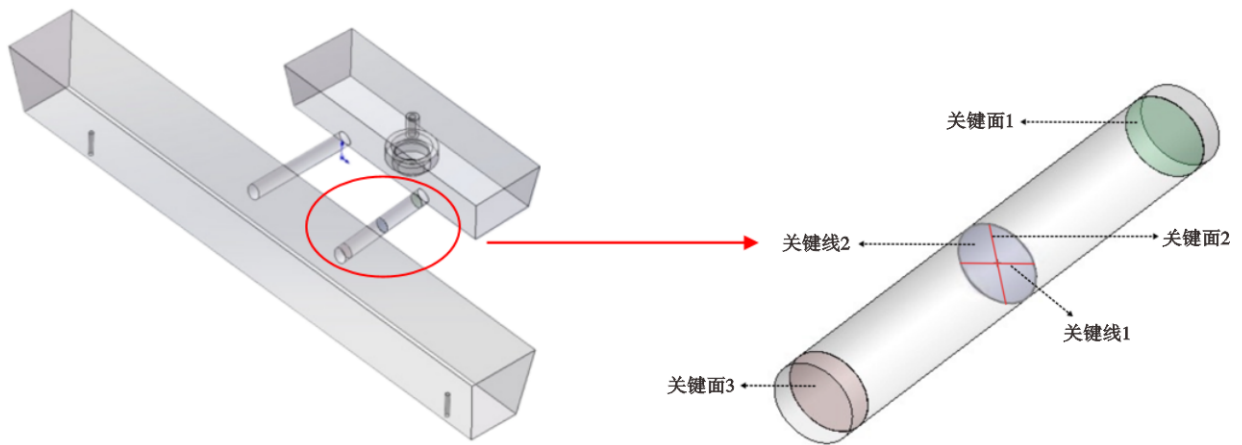


图5 中间包内关键面和关键线的定义

Fig. 5 Definition of key surfaces and lines in the tundish

口 50 mm 的垂直圆形通道截面,关键面 2 为过通道中心点的垂直圆形截面,关键面 3 为距离通道出口 50 mm 的垂直圆形通道截面;关键线 1 与关键线 2 均布置在通道中点,两条线互相垂直,分别对应通道的水平直径与垂直直径。

### 3 计算结果与讨论

设置感应线圈电流为 772 A,通道外展角度变化范围 $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ,计算磁感应强度、电流密度和焦耳热。

#### 3.1 磁场强度分布分析

图 6 为 $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 外展角度下,三处关键面的磁感应强度分布云图,其中,每个关键面的云图按角度递增顺序(从左至右)排列。通道截面上的磁感应强度分布并不均匀,靠近感应线圈的区域磁感应强度最大,明显高于远侧;磁感应强度最小点不在通道中心点,而是呈偏心分布。对比分析可知,随着通道外展角度增大,关键面 1 和关键面 2 上磁感应强度基本不变,而关键面 3 随着外展角度的增大磁感应强度逐渐衰减,这是由于关键面 1 位于通道入口附近,连接着中间包注入室。由于,其空间位置相对固定,即使通道角度增大,该截面与感应线圈的相对距离也基本保持不变,因此磁感应强度的整体波动幅度不大;关键面 2 位于通道中部,正处于磁场的核心区域。通道角度的变化对该位置的磁路扰动极小,使得磁感应强度分布始终维持在最高且最稳定的状态。而关键面 3 位于通道出口附近,距离线圈垂直距离最远,受影响最大,由于磁路的物理特性外展角度越大衰减越明显。

图 7 展示了通道中心截面沿径向与垂直径向上的磁感应强度分布曲线。从图 7(a)可以看出,

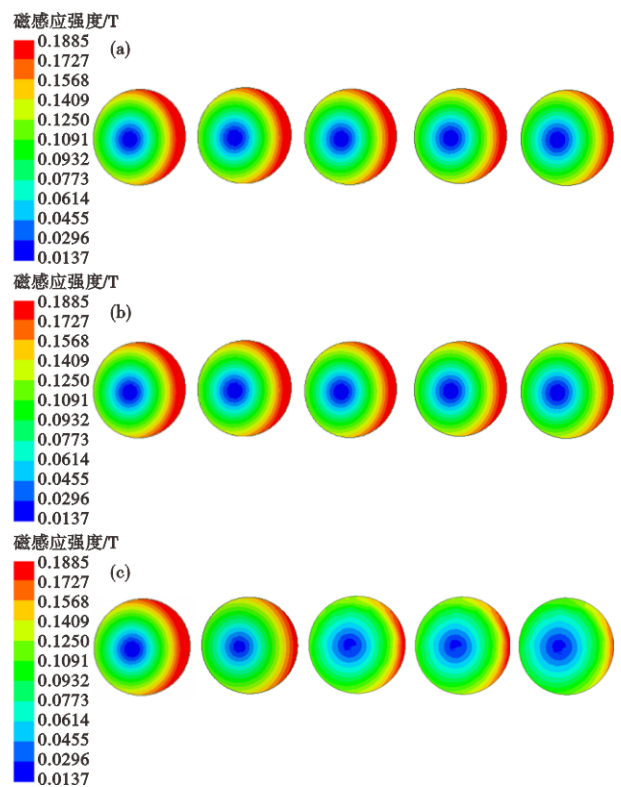


图6 中间包通道关键面上磁感应强度B分布情况:(a)关键面 1,(b)关键面 2,(c)关键面 3

Fig. 6 Distribution of magnetic induction intensity B on the key surface of tundish channel : (a) Key face 1, (b) Key face 2, (c) Key face 3

在不同通道角度下,径向磁感应强度分布规律一致,整体呈“√”形不对称分布。在通道直径 0.055 m 处,磁感应强度最低,其值为 0.003 T。图 7(b)表明,垂直于径向方向上的磁感应强度分布也呈现类似规律,大致呈“V”形对称分布。在通道径向截面的同一位置处,随着通道角度变化,磁感应强度最小

值出现的位置基本保持不变,且各角度下的最小值差异不大。以最小值为分界点,沿水平径向与垂直径向向朝通道边界方向,磁感应强度均呈现线性递增趋势。在加热功率相同的条件下,通道中心截面上的磁感应强度分布规律保持一致,但随着通道角度的增大,磁感应强度略有减小。这一差异在中心截面上整体呈现较小,尤其在径向方向上,各角度下的分布曲线几乎重合。

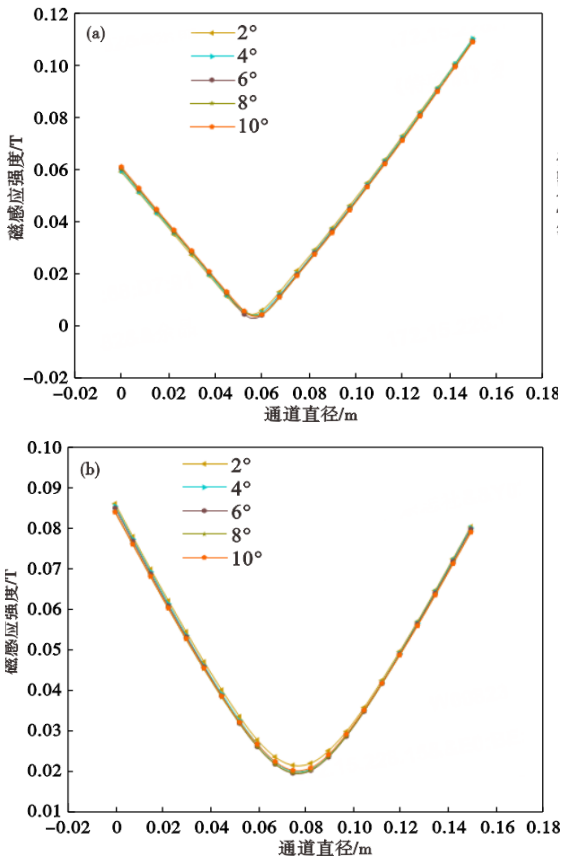


图7 中心截面上关键线磁感应强度B:(a)中间通道水平径向,(b)中间通道垂直径向  
Fig. 7 Magnetic induction intensity B at the key lines on the central cross-section : (a) Horizontal radial of intermediate channel, (b) Vertical radial of intermediate channel

### 3.2 电流密度分布分析

图8所示为通道三处关键面在不同外展角度下的电流密度分布云图,每个关键面从左至右依次为2°、4°、6°、8°、10°。从图8中可以看出,电流密度在通道截面内呈现明显的非均匀分布特征:在通道的进出口附近关键面1和关键面3上,最大电流密度均出现在通道边缘区域,这是由于集肤效应,在交变磁场作用下,感应电流主要集中于导体表面;通道中心关键面2上,整体靠近感应线圈侧的感应电

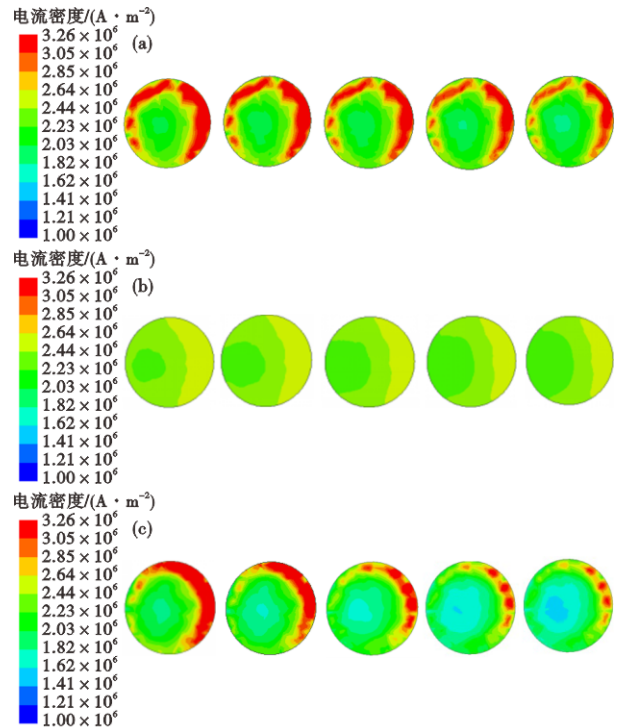


图8 中间包通道关键面上电流密度J分布情况:(a)关键面1,(b)关键面2,(c)关键面3  
Fig. 8 The distribution of current density J on the key surface of tundish channel : (a) Key face 1, (b) Key face 2, (c) Key face 3

流密度要大于远离感应线圈侧的感应电流密度。随着通道外展角度的增大,各截面上的电流密度整体呈下降趋势。其中,出口附近关键面3的下降最为明显,证明角度引起的磁场衰减主要发生在通道后半部分。综合对比显示,2°为最优角度,此时通道整体的电流密度均保持在 $1.70 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 以上。此外,对比三个截面还可发现,通道两端的电流密度整体高于中心,这主要源于端部效应:在通道入口和出口处,磁力线发生畸变与集中,从而增强了该区域的感应电流密度。

图9为通道中心截面沿径向与垂直径向方向上的感应电流密度分布。其中,图9(a)为通道截面径向方向上的电流密度分布曲线,可以看出最大值出现在靠近感应线圈一侧,并随着与线圈距离的增大而逐渐减小。2°时的最大值为 $1.91 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ,10°时的最大值为 $1.88 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ,二者相差 $0.03 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ 。此外,随着通道外展角度的增大,径向各位置处的电流密度值整体呈下降趋势。在垂直于径向的截面上,焦耳热分布呈开口向上的抛物线形态。如图9(b)所示,通道中心区域的焦耳热值较低,而靠近上下边界的区域则逐渐增大;随着通道外展角度增

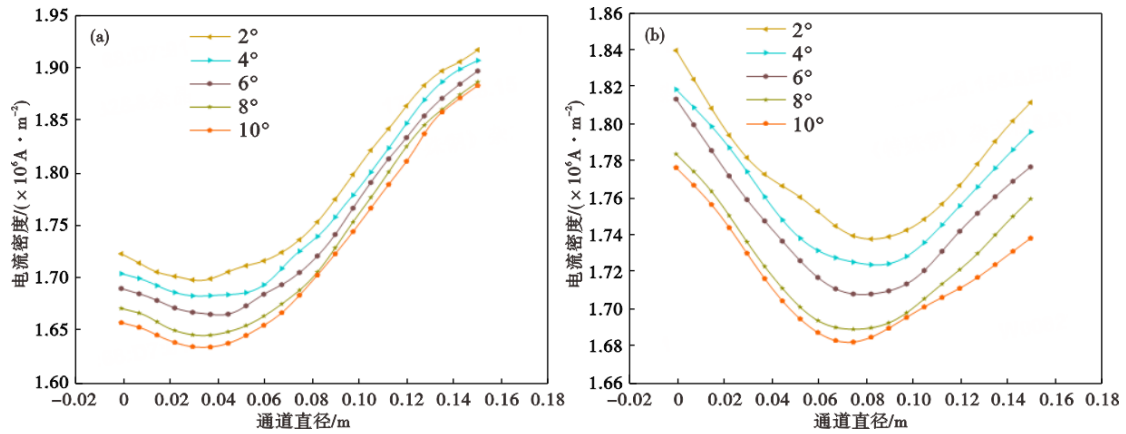


图9 中心截面上关键线电流密度J:(a)中间通道水平径向,(b)中间通道垂直径向

Fig. 9 Current density J at the key lines on the central cross-section : (a) Horizontal radial of intermediate channel, (b) Vertical radial of intermediate channel

大,该方向上的焦耳热整体减小,但其空间分布形态保持不变。

### 3.3 焦耳热分布分析

图10为通道2°~10°外展角度下的关键面焦耳热分布情况。焦耳热由感应电流流经钢液时因电阻效应转化而来,因此,其空间分布规律与感应电流大致相同:随着通道外展角度逐渐增大,各关键面焦耳热值相应降低,出口附近关键面3的焦耳热衰减最为明显。这说明通道外展角度越大,钢液在通道中尤其是出口附近获取的热量越少,中间包的整体感应加热效率降低。

图11为通道中心截面沿径向与垂直径向方向上的焦耳热分布,由图11(a)可知,在通道中心水平直径上,靠近感应线圈区域的焦耳热较大,距离感应线圈越远,焦耳热也越来越小,焦耳热沿着远离感应线圈的方向逐渐递减。在直径0~0.08 m处,焦耳热衰减幅度最大:2°时,通道直径0 m的焦耳热为 $2.10 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ ,10°的焦耳热为 $1.91 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ ,衰减 $0.19 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ ;在直径0.14 m~0.15 m处,焦耳热衰减幅度最小:2°时,通道直径0.15 m的焦耳热为 $2.91 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ ,10°的焦耳热为 $2.78 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ ,焦耳热衰减 $0.13 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ 。

## 4 结论

1)在772 A激励电流下,随着通道外展角度增大,通道几何中心相对于感应线圈发生偏移,导致磁感应强度、感应电流密度及单位体积内焦耳热均呈下降趋势,其中,出口区域的衰减最为显著:电流密度和焦耳热由8°到10°分别下降 $0.034 \times 10^6$ 、 $0.138 \times 10^6 \text{ W/m}^3$ ,表明磁场能量的衰减主要发生在

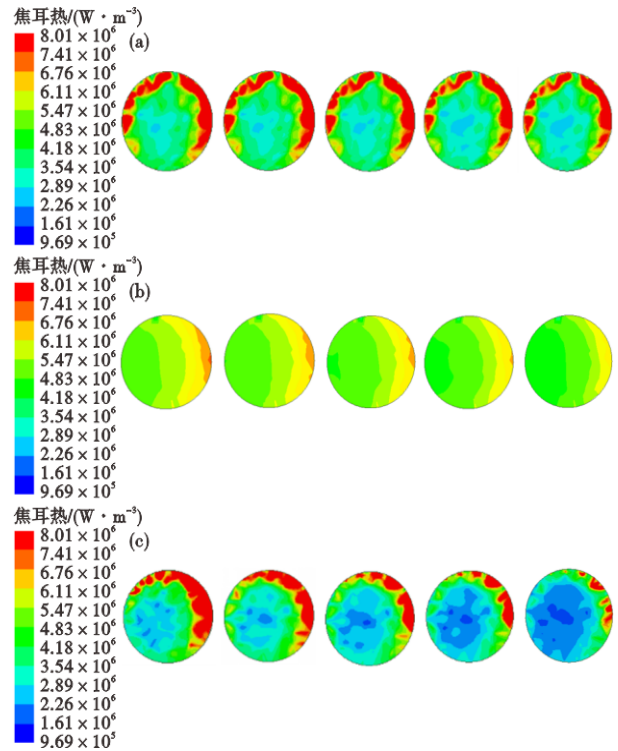


图10 中间包通道关键面上焦耳热Q分布情况:(a)关键面1,(b)关键面2,(c)关键面3

Fig. 10 Joule heat Q distribution on the key surface of tundish channel : (a) Key face 1, (b) Key face 2, (c) Key face 3

通道后半段。

2)磁场在通道中心截面上呈偏心分布,靠近线圈一侧的电磁参数明显高于远侧,同时,受端部效应影响,通道入口与出口处的磁力线发生畸变与集中,这导致该区域的电流密度高于中间区域。

3)综合以上发现,2°外展角为最优设计参数。该条件下近线圈侧磁感应强度达到0.188 T,整体感

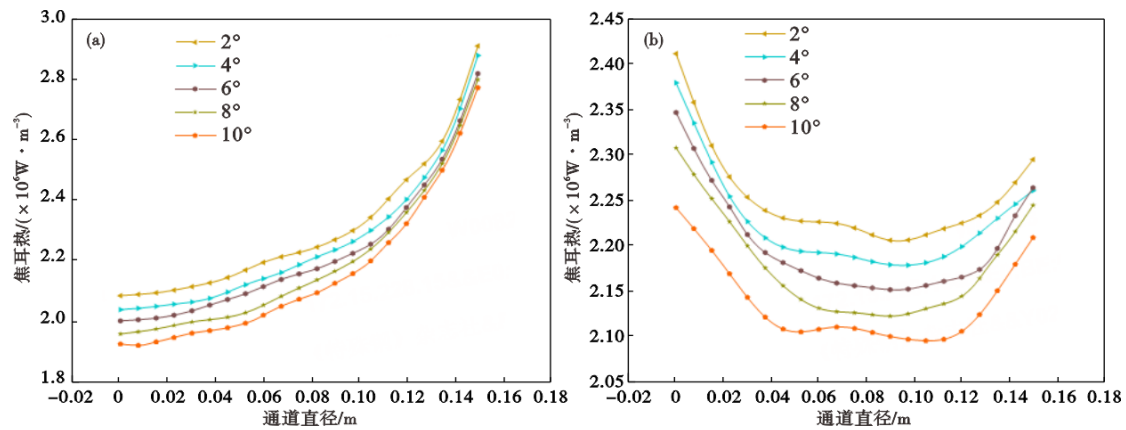


图 11 中心截面上关键线焦耳热  $Q$ : (a) 中间通道水平径向, (b) 中间通道垂直径向

Fig. 11 Joule heating  $Q$  at the key lines on the central cross-section: (a) Horizontal radial of intermediate channel, (b) Vertical radial of intermediate channel

应电流密度保持在  $1.70 \times 10^6 \text{ A/m}^2$  以上, 从而实现更高的能量转化效率与加热性能。因此, 在实际工程

中应优先采用  $2^\circ$  或邻近小角度设计, 以最大化电磁耦合效率与生产效益。

#### 参考文献

- [1] 王爱东, 王彬, 徐海芳, 等. 连铸全程保护浇注的探讨[J]. 耐火与石灰, 2025, 50(5): 15-18.
- [2] 李玉峰, 孙彦辉, 宋思程, 等. 六流中间包挡墙优化的数值模拟和工业实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 7-13.
- [3] 姜学锋, 时朋召, 王玉平, 等. 单流厚板坯中间包物理模拟研究和应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 16-21.
- [4] Tang Y, Fellner W, Lukesch G, et al. The application of the state-of-the-art turbulence models in the OpenFOAM CFD codes and the validation for different flow control cases in the continuous casting process[J]. Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications, 2025, 52(6): 626-635.
- [5] 雷雨恒. 槽式感应加热中间包的模拟研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2024.
- [6] 唐英淇. 中间包连续测温技术在连铸中的开发应用[J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 127-129.
- [7] 钟巍, 徐蕊, 王海军, 等. 换包过程中连铸中间包内多相流动行为研究[J]. 炼钢, 2022, 38(4): 63-70.
- [8] Qin X F, Cheng C G, Li Y, et al. Dimensional analysis of slag eye in tundish with annular argon bubbling process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2025, 56(5): 5574-5590.
- [9] Zhao Y S, Wang T Y, Geng M J, et al. Effects of sidewall gas blowing and slag layer on flow and tracer transport in a single-strand tundish[J]. Modelling, 2025, 6(3): 87-87.
- [10] 潘栋, 郭庆涛, 于赋志, 等. 中间包电磁感应加热技术研究及应用进展[J]. 连铸, 2022, 41(4): 2-7+15.
- [11] 李京社, 王存, 陈永峰, 等. 中间包等离子体加热技术研究进展及应用[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 1-11.
- [12] 姜学锋, 时朋召, 王玉平, 等. 单流厚板坯中间包物理模拟研究和应用[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 16-21.
- [13] 霍佳, 宋思程, 陈良勇, 等. 新型通道式感应加热中间包流场的模拟与优化[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(12): 1555-1565.
- [14] 张晗, 代传民, 雷洪, 等. 通道式感应加热中间包钢液流动特性的数值模拟[J]. 连铸, 2021, 40(5): 54-59.
- [15] 林佩池. 间歇式感应加热中间包多物理场基础特性数值模拟研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2024.
- [16] 路瑶. 电磁感应中间包磁热流宏观传输行为[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2023.
- [17] 杨斌. 电磁感应加热中间包磁-热-流特性和夹杂物去除的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [18] 段鹏飞, 杨斌, 邓安元, 等. 板坯电磁加热中间包钢液流动特性和结构优化[J]. 连铸, 2022, 41(4): 27-35.
- [19] 霍佳, 宋思程, 陈良勇, 等. 新型通道式感应加热中间包流场的模拟与优化[J]. 钢铁研究学报, 2024, 36(12): 1555-1565.
- [20] Chen X Q, Xiao H, Wang P, et al. Magnetic-flow-thermal characteristics of an innovative four-channel induction heating tundish[J]. Steel Research International, 2022, 93(7): 2100839.