



## 机械压下工艺对 22MnB5 钢板坯质量的影响

曹 堃<sup>1</sup>, 曲 硕<sup>1,2</sup>, 刘 震<sup>2</sup>, 宫玉锬<sup>2</sup>, 林玉文<sup>2</sup>

(1 唐山惠唐新事业股份有限公司, 唐山 063000; 2 河钢集团唐钢公司, 唐山 063000)

**摘 要:**针对 1 400 mm×300 mm 厚度的 22MnB5 钢板坯内部质量问题, 构建了板坯凝固过程的动网格机械压下模型, 该模型综合考虑了流动、传热、凝固和溶质等多物理场因素, 分析了压下量和压下区间对铸坯内部质量的影响。研究表明, 施加机械压下可以有效改善铸坯中心偏析, 且压下量越大, 改善效果越明显。特别是当施加 10 mm 压下时, 铸坯中心偏析显著减轻, 偏析比降低。此外, 压下位置的选择也至关重要, 在拉速 1.0 m/min、过热度 20 °C 条件下, 当压下位置位于距结晶器弯月面 14~18 m 区间、固相率为 0.05~0.45 时, 偏析现象加剧; 而当压下位置位于距结晶器弯月面 16~20 m 区间、固相率为 0.2~0.95 时, 压下操作能够有效促进溶质迁移, 从而改善铸坯的偏析问题。

**关键词:**钢板; 连铸; 机械压下; 偏析度; 数值模拟; 低倍试验

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2025-00173 **中图分类号:**TF777

## Effect of Mechanical Reduction Process of 22MnB5 Steel Slab

Cao Kun<sup>1</sup>, Qu Shuo<sup>1,2</sup>, Liu Zhen<sup>2</sup>, Gong Yukun<sup>2</sup>, Lin Yuwen<sup>2</sup>

(1 Tangshan Huitang New Business Co., Ltd., Tangshan 063000, China; 2 TangSteel Company, Heisteel Group, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** To address the internal quality issues of 1 400 mm × 300 mm thick 22MnB5 steel slabs, a dynamic mesh mechanical soft-reduction model for slab solidification was developed. This model integrates multiple physical fields, including fluid flow, heat transfer, solidification, and solute transport, to analyze the effects of reduction amount and reduction zone on slab internal quality. The results show that mechanical soft reduction can effectively mitigate centerline segregation, and the improvement becomes more pronounced with increasing reduction amount. In particular, when a 10 mm reduction is applied, centerline segregation is significantly alleviated, with a notable decrease in the segregation ratio. Furthermore, the selection of reduction position is critical. Under a casting speed of 1.0 m/min and a superheat of 20 °C, applying reduction in the region 14 m–18 m below the mold meniscus, where the solid fraction is 0.05–0.45, exacerbates segregation. Conversely, when reduction is applied in the region 16–20 m below the meniscus, corresponding to a solid fraction of 0.20–0.95, solute transport is promoted, thereby improving segregation in the slabs.

**Key Words:** Steel Plate; Continuous Casting; Mechanical Reduction; Segregation; Numerical Simulation; Macro Test

板坯宏观偏析作为一种典型的内部质量缺陷, 一直是冶金领域亟待解决的关键技术难题。针对其形成机制, 研究者提出了多种理论模型, 包括热溶质对流<sup>[1]</sup>、热收缩效应<sup>[2]</sup>、枝晶桥接作用<sup>[3]</sup>、凝固收缩现象<sup>[4]</sup>以及壳体鼓胀变形<sup>[5]</sup>等。这些理论从不同角度解释了偏析的产生机制及其演化过程。在此基础上, 唐钢工业实践结果中发现, 机械压下作为一种工艺调控手段, 能够有效改善宏观偏析现象, 特别是中高碳钢种, 效果尤其明显, 是目前最直接且行之有效的控制策略之一。通过合理优化机械压下参数, 可在凝固末期促进富溶质熔体的均匀分布, 从而显著降低偏析程度, 提高板坯的内部质量。

然而, 在实际生产过程中进行机械压下的时, 板

坯的内部质量并不稳定, 时常出现波动。经过调研分析发现, 决定质量优劣的关键因素主要在于压下区间和压下量。合理确定压下区间可以有效控制凝固过程中的偏析和疏松问题, 而适宜的压下量则直接影响最终成形质量。因此, 优化这两个参数对于提升连铸板坯的内部质量至关重要。已有研究对压下的最佳固相率范围提出了不同建议: 部分学者认为应在最终凝固阶段进行<sup>[5]</sup>, 也有观点主张覆盖整个凝固过程<sup>[6]</sup>, 但绝大多数学者认为应在固相率 0.3~0.9 之间进行压下, 并在后续进行保压处理<sup>[7-9]</sup>。各钢铁企业在生产实践中结合数值模拟与现场试验<sup>[10-16]</sup>, 普遍通过建立凝固传热模型、优化二冷冷却制度及扇形段压下参数, 实现了不同钢种内

**作者简介:** 曹 堃(1984—), 女, 本科, 高级工程师; **E-mail:**290043777@qq.com; **收稿日期:** 2025-07-24

**通信作者:** 曲 硕(1995—), 男, 硕士, 工程师; **E-mail:**397954347@qq.com

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

部质量的提升。其中,不同工艺条件下的成功案例共同表明,压下位置应与固相率分布紧密匹配,且总压下量与分段策略需协同优化,以提高致密度、细化晶粒并显著降低中心偏析程度。

为了提升产品质量,不同学者和钢厂从理论分析与实际生产角度提出了诸多见解。然而,对于22MnB5钢等高溶质钢种的机械压下工艺,目前,尚未形成统一结论。本研究以优化唐钢22MnB5钢的铸坯质量为目标,利用ANSYS商业软件建立机械压下模型,深入探讨了中高碳钢连铸过程中二冷区水量与机械压下参数的匹配关系,系统分析了压下工艺对铸坯内部质量的影响规律。通过优化压下参数,并结合现场试验,确定了有效控制中心偏析的工艺方案,为板坯连铸技术的优化设计与实际运行提供了重要参考。

## 1 数学模型与工业试验说明

### 1.1 控制方程

#### 1.1.1 流动及湍流模型

连续性方程如式(1)

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

动量方程如式(2)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{U}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \cdot \mathbf{U}) - \nabla P + S_p + F_b \quad (2)$$

式中, $\mathbf{U}$ 为钢液的流动速度,m/s; $\rho$ 为钢液的密度, $\text{kg/m}^3$ ; $\mu_{eff}$ 为有效黏度, $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ ; $P$ 为静压力,Pa; $S_p$ 为动量源项; $F_b$ 为热溶质浮力, $\text{N/m}^3$ 。

#### 1.1.2 凝固传热模型

能量守恒方程如式(3)、式(4)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} H) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) \quad (3)$$

$$k_{eff} = \begin{cases} k_l + \mu_l / \text{Pr}_l, & T \geq T_l \\ k_s \cdot f_s + k_l \cdot f_l, & T_s < T < T_l \\ k_s, & T \leq T_s \end{cases}$$

$$H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT + f_l L \quad (4)$$

式中, $k_{eff}$ 为有效导热率, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ ; $T$ 为温度,K; $H$ 为总焓。

#### 1.1.3 溶质传输模型

溶质守恒方程如式(5)

$$\frac{\partial(\rho C_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} C_i) = \nabla \cdot (\rho f_s D_{s,i} \nabla C_{s,i}) + \nabla \cdot \left[ f_l \left( \rho D_{l,i} + \frac{\mu_l}{S_{C_l}} \right) \nabla C_{l,i} \right] \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \left[ \rho f_s (\mathbf{U} - \mathbf{U}_s) (C_{l,i} - C_{s,i}) \right] \quad (5)$$

式中, $D_{l,i}$ 和 $D_{s,i}$ 分别为组分*i*在液相和固相中的溶质扩散系数, $\text{m}^2/\text{s}$ ; $S_{C_i}$ 表示湍流Schmidt数,本文中使用的1.0; $C_i$ 为组分*i*的混合溶质浓度,%; $C_{l,i}$ 和 $C_{s,i}$ 分别为组分*i*在液相和固相中的溶质浓度,%。

偏析比如式(6)

$$C_{ratio} = \frac{C_{mix}}{C_0} \quad (6)$$

式中, $C_{ratio}$ 为碳的偏析比; $C_{mix}$ 为碳固液相混合浓度,%; $C_0$ 为碳的初始浓度,%。

#### 1.1.4 机械压下模型

为了研究机械压下对22MnB5钢内部质量的影响,本研究采用了边界动网格技术来模拟压下过程中的变形行为如图1、图2所示。模型整体分为三个部分:第一部分为机械压下前的状态,与未施加机械压下时的状态相同;第二部分为机械压下阶段,采用边界动网格技术。在铸坯凝固值达到第二部分前沿位置时,通过ANSYS FLUENT中的二次开发(udf),建立了边界与拉速和时间的关系,并将压下量引入公式中,从而实现了机械压下过程。本模型旨在通过在等通量条件下变速,推动未凝固部分的钢液流动并带动溶质迁移,从而完成机械压下过程;最后,当铸坯进入第三部分时,将第三部分的网格设置为压下后的铸坯尺寸。

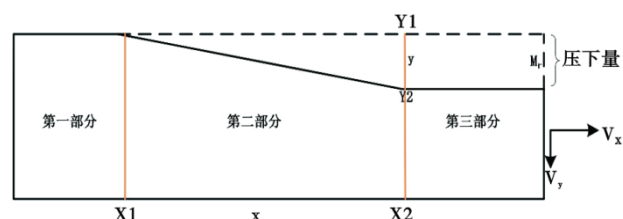


图1 机械压下模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical reduction model

## 1.2 边界条件

### 1.2.1 入口边界条件

浸入式水口的入口速度 $v_{in}$ 、湍动能 $k$ 以及湍流耗散率 $\varepsilon$ 可以根据式(7)~(8)求得,入口温度为浇注温度 $T_0$ ,入口溶质浓度为初始溶质溶度 $C_0$ 。

$$v_{in} = \frac{v_{cast} \cdot S_{out}}{S_{in}} \quad (7)$$

$$k = 0.01 v_{in}^2 \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{1.5}}{R_{noz}} \quad (9)$$

式中, $v_{cast}$ 为连铸过程中的拉速, $S_{out}$ 为结晶器出口的

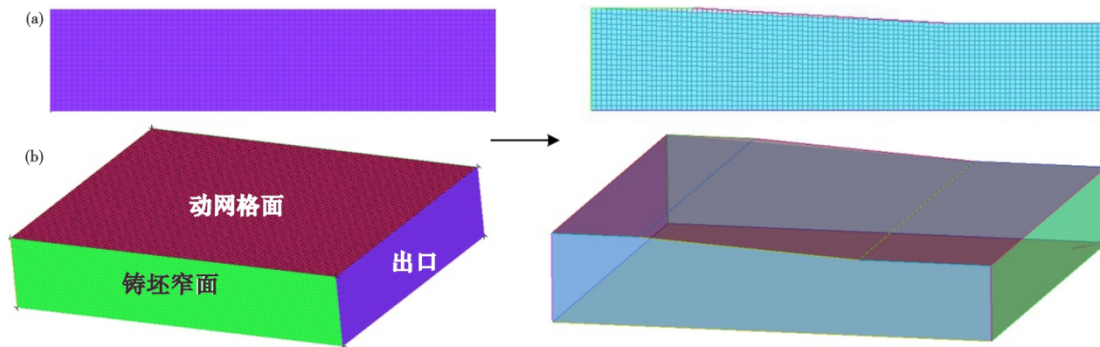


图2 机械压下网格(a)与动网格(b)

Fig. 2 Mechanically pressed mesh(a) and dynamic mesh (b)

截面积,  $S_m$  为浸入式水口的入口截面积,  $R_{noz}$  为水口的当量直径。

1.2.2 自由表面边界条件

模型中不考虑保护渣的影响,将模型顶面与水口壁面处理为绝热边界条件,各变量法向梯度为0。如式(10)。

$$\frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{\partial v_z}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = v_y = 0 \quad (10)$$

1.2.3 机械压下第二部分边界条件

模型中不考虑保护渣的影响,将模型顶面与水口壁面处理为绝热边界条件,各变量法向梯度为0,共需考虑  $V_x$ ,  $V_y$  和网格变形公式,如式(11)~(13)。

$$V_x = \frac{w}{w - y} \quad (11)$$

$$V_y = \frac{(y - Y_1)}{(x - X_1)} V_x \quad (12)$$

$$y = \frac{Mr}{(X_2 - X_1)} x + 0.15 \quad (13)$$

式中,  $w$  为连铸坯窄面长度, m;  $V_x$  为拉坯方向速度, m/s;  $V_y$  为拉坯法相方向速度, m/s;  $Mr$  为压下量, m; 公式 13 为动网格移动二元一次方程组。

1.3 数值模拟过程

以某厂连铸坯 22MnB5 为研究对象,其表 1、表 2 为其钢种组成成分、计算的连铸工艺参数和热物性参数。

采用有限体积计算软件 ANSYS FLUENT,建立了 22MnB5 钢板坯机械压下模型。在该模型中,采用 Simple 计算方法,求解涉及流体流动、传热凝固以及溶质传输等方面的控制方程。并通过边界动网格技术模拟了连铸坯机械压下过程。为确保计算精度,每个时间步的最大迭代次数设置为 40 次,时间步长为 0.02 s,能量守恒方程的残差小于  $10^{-5}$ ,其他方程的残差小于  $10^{-3}$ 。

1.4 试验方法及说明

以唐钢连铸坯 22MnB5 钢为研究对象,表 3 为试验方案。在跟踪连铸坯 22MnB5 钢的生产流程过程中,每一个实验方案均采用独立炉次进行连铸操作。在钢水浇铸完成后,针对每炉铸坯,按照拉坯方向截取一定长度的铸坯样本。通过对这些样品进行横向切片处理,获取的试样随后进行抛光处理。抛光后的试样在盐酸和水 1:1 的混合溶液中酸洗 20~30 min,之后得到具有低倍组织结构的试样。

表 1 连铸工艺参数和钢的物性参数

Table 1 The continuous casting process parameter and physical properties of steel

工艺参数		物性参数	
连铸坯尺寸/mm <sup>2</sup>	1 400×300	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 000
结晶器有效长度/m	0.80	热膨胀系数	0.011
连铸坯拉速/(m·min <sup>-1</sup> )	1.0	溶质膨胀系数	0.000 2
浇注温度/K	1 801	碳平衡分配系数	0.34
过热度/K	20	液相黏度/(kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.006
冷却水温度/K	300	纯铁熔点/K	1 808
环境温度/K	300	液相线斜率	-78
液相溶质扩散系数/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	2×10 <sup>-8</sup>	热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	34
固相溶质扩散系数/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1×10 <sup>-9</sup>	潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )	272 000

表2 22MnB5钢种成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of 22MnB5 steel %						
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0.22~0.25	0.22~0.23	1.25~1.27	≤0.05	≤0.05	0.24~0.25	0.10~0.20

表3 试验方案

Table 3 Experimental plan

试验	机械压下参数
方案1	压下量为6 mm,压下区间(距结晶器弯月面)为16~20 m
方案2	压下量为8 mm压下区间(距结晶器弯月面)为16~20 m
方案3	压下量为10 mm压下区间(距结晶器弯月面)为16~20 m
方案4	压下量为10 mm压下区间(距结晶器弯月面)为14~18 m
方案5	压下量为10 mm压下区间(距结晶器弯月面)为18~22 m

最后,利用显微镜等设备对这些低倍组织进行观察、测量,并对组织情况进行统计与分析。

### 1.5 低倍组织取样

在获取低倍组织数据后,进一步对铸坯进行碳偏析分析。采用 $\phi 5$  mm的钻头对试样进行钻孔取样,每次取样的重量约为2 g。取样后,样品将进行碳硫含量分析,以评估其碳偏析情况。取样的位置如图3所示,确保在不同位置进行样本采集,以全面分析铸坯的碳分布情况。

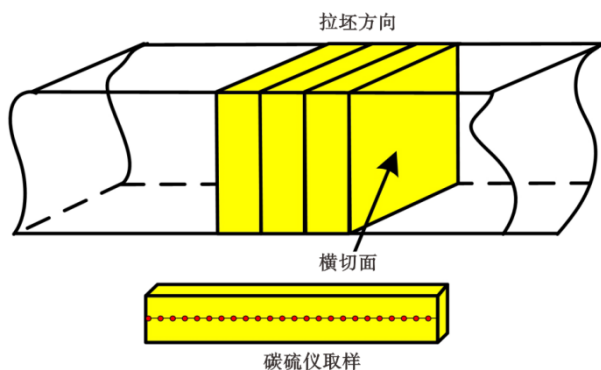


图3 低倍组织取样示意图

Fig. 3 The schematic diagram of macrostructure sampling

## 2 结果及分析

### 2.1 模型的验证

在本研究中,使用雷泰3i Plus红外测温仪对铸坯表面进行了温度测量,每个测温点进行了5次测量,以确保数据的可靠性。由于铸坯表面有氧化铁皮,测量时选择了最高温度作为准确值,而不是简单地取平均值。随后,将测得的温度与模型计算的

温度进行了对比,结果如图4所示。

由图4可知,随着铸坯远离弯月面,其表面温度呈现出逐步下降的趋势。然而,在各个扇形段的连接处,铸坯温度出现回升现象。该现象的原因在于铸坯在冷却过程中仍释放着凝固潜热,当冷却水流量发生变化时,铸坯表面温度回升。实际测量验证了这一现象,且与数值模拟结果一致,进一步证明了传热模块数值模拟的准确性。

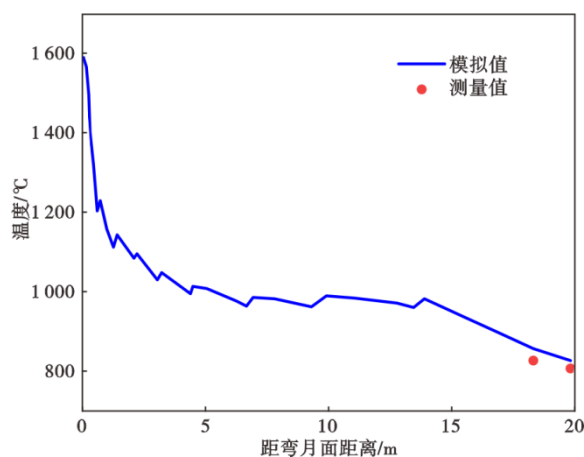


图4 出坯口测温图

Fig. 4 Temperature measurement diagram at the slab exit

图5展示了碳硫仪检测碳含量结果与数值模拟结果的对比情况。通过图5可以看出,模拟值和实测值在整体趋势上保持一致,尽管两者之间存在一些小幅度的数值差异。这些差异可能是由于实验条件的微小变化或模拟模型的局限性所引起的。通过图4与图5的共同验证,进一步证明了数值模拟结果的准确性,表明模拟方法在碳含量检测中的有效性和可靠性。

### 2.2 不同压下量对铸坯内部质量的影响

图6展示了在实施动网格后,铸坯宽面坯壳速度变化的云图,压下区间为16~20 m。从图6中可以看出,当没有施加动网格变化时,铸坯宽面坯壳的速度为0.016 0 m/s,这是拉坯的基本速度。随着动网格变化量的增加,当动网格变化为5 mm,相当于施加了5 mm的压下量时,坯壳的速度略微增加至0.016 2 m/s;当动网格变化为10 mm,相当于施加了10 mm的压下量时,坯壳的速度进一步增至0.016 4 m/s。由此可见,施加的压下量越大,铸坯宽面坯壳的速度也随之增大。这一结果表明,动网格的变化对坯壳速度产生了影响,并且随着压下量的增加,速度也呈现出逐步增大的趋势。

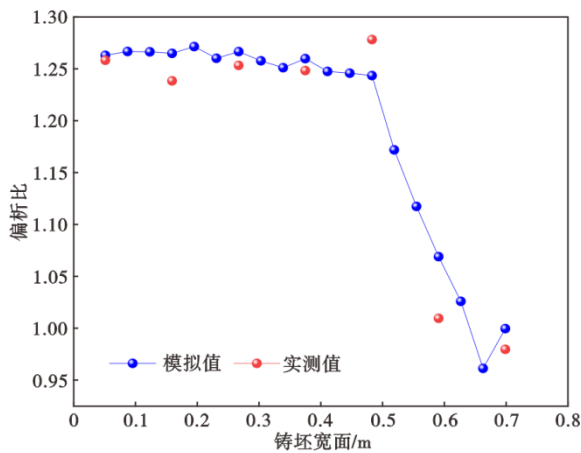


图5 碳硫仪检测结果与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of carbon and sulfur instrument test results with simulation results

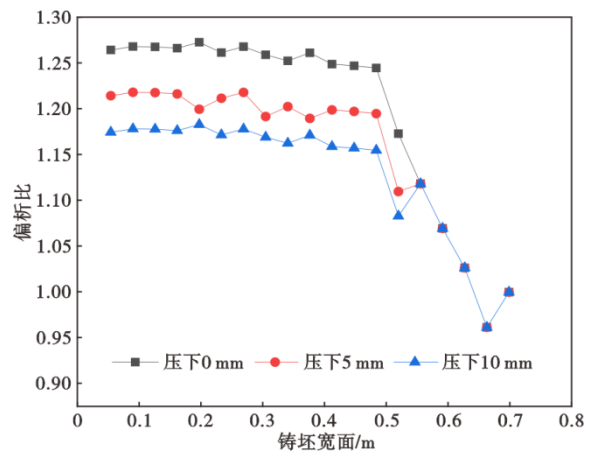


图7 不同压下量对偏析比的影响

Fig. 7 Effect of different reduction on segregation ratio

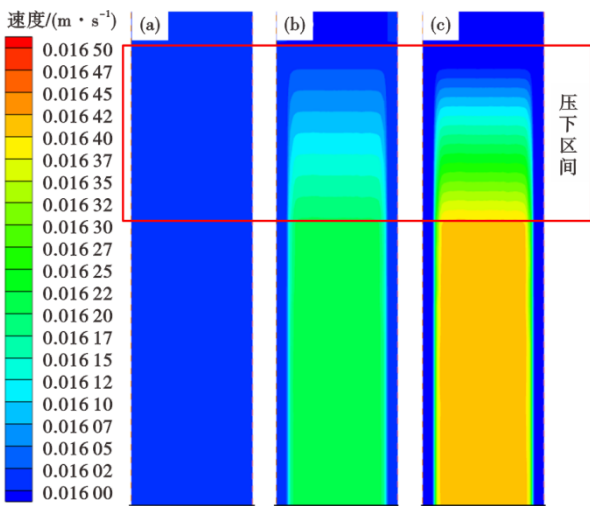


图6 动网格影响的铸坯宽面速度变化云图:(a)机械压下0 mm,(b)机械压下5 mm,(c)机械压下10 mm

Fig. 6 The change cloud diagram of slab wide surface velocity affected by dynamic mesh:(a) mechanical reduction of 0 mm, (b) mechanical reduction 5 mm, (c) mechanical reduction 10 mm

图7为不同压下量对偏析比的影响。从图7可以看出,偏析比的整体趋势相似,初始阶段偏析比下降,随后逐渐上升,最终趋于平稳。这一现象的发生可以通过铸造过程的不同阶段加以解释。开始阶段偏析比下降,主要是由于此时处于结晶器冷却阶段,在水口冲刷的作用下,负偏析形成导致了偏析比的下降。随着时间的推移,糊状区内的溶质逐渐积累,根据定向凝固的基本原理可知,当糊状区中的溶质增加时,凝固过程中溶质分配也会发生变化,导致偏析比逐渐上升。最终,在铸坯宽面完全凝固后,溶质分布趋于稳定,偏析比趋于平稳。

在铸坯宽面0.55 m以后,由于铸坯已经完全凝固,机械压下作用不再对这一区域产生影响,因此,不同压下量下的偏析比基本保持一致。当不施加压下量时,偏析比达到最大值1.275;而当施加5 mm的压下量时,受到机械压下的影响,坯壳受到应力挤压开始加速运行,同时,铸坯内部的钢液受到挤压,溶质会向拉坯的反方向迁移。因此,在完全凝固后,铸坯内部的偏析比降低至1.220,低于不施加压下量时的值。当施加10 mm压下量时,挤压作用更为显著,铸坯内部的偏析比降至最小值1.175,这表明,施加10 mm压下量时,对中心偏析的改善效果更为明显。由此可见,施加10 mm机械压下能够有效改善22MnB5钢的铸坯的中心偏析情况。

图8展示了不同压下量下碳硫仪检测试样的对比结果。从图8中可以看出,施加机械压下确实对改善铸坯内部的中心偏析具有积极作用,从而改善了铸坯的内部质量。当施加5 mm压下量时,中心偏析度较未施加压下量时减轻了4.73%;而当施加10 mm压下量时,中心偏析度较未施加机械压下时减轻了9.46%。这一结果表明,施加10 mm压下量在改善22MnB5钢铸坯内部质量方面效果更为显著,能够更有效地减轻中心偏析,从而提升铸坯的质量。

### 2.3 不同压下区间对铸坯内部质量的影响

图9展示了22MnB5钢中心固相率的变化曲线。从图9中可以看出,在距结晶器弯月面13.5 m之前,铸坯中心的固相率完全为液相。随着二冷段的持续冷却,中心固相率逐渐增加,直到距离增加至20.5 m时,铸坯中心完全转变为固相。因此,糊状区的范围大致位于13.5~20.5 m。其糊状区范围便是压下区间的范围,又因为压下区间依托于扇形段,

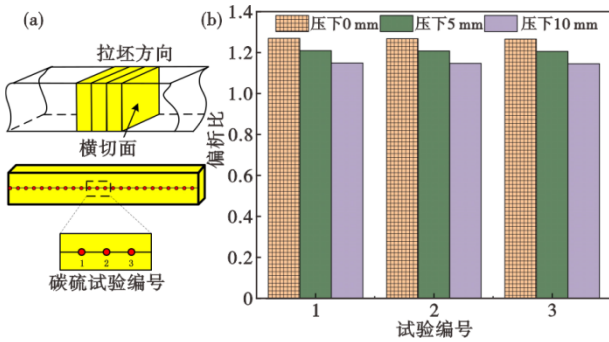


图 8 不同压下量碳硫仪试样(a)和偏析比对比图(b)

Fig. 8 Different reduction amount carbon-sulfur instrument specimen (a) and segregation ratio comparison chart (b)

需要根据扇形段进行调节,因此,选取三个压下区间:14~18 m, 16~20 m, 18~22 m。

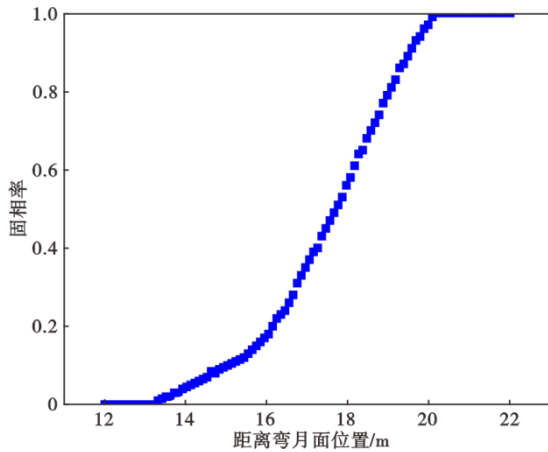


图 9 22MnB5 钢中心固相率变化曲线

Fig. 9 The central solid fraction variation curve of 22MnB5 steel

图 10 展示了压下区间对偏析比的影响。由图 10 可知,当压下区间设置在 14~18 m 时,铸坯的固相率处于 0.05~0.45 区间段,由于该区间位置较为靠前,压下后仍存在大量未凝固的钢液。这种情况促进了压下区间段溶质向 18 m 以后的钢液流动,反而导致了施加机械压下后中心偏析的加剧。这表明,较前端的压下区间未能有效控制溶质分布,造成了偏析比的上升。当压下区间设置在 16~20 m 时,铸坯的固相率处于 0.2~0.95 区间段。在该区间进行压下时,相较于未施加压下的情况,整体中心偏析得到了显著改善。偏析比从 1.275 下降至 1.178,表明在这一区间段施加机械压下能够提供较大的补缩作用,改善了铸坯中心的疏松现象。同时,铸坯中心的溶质受机械压下的影响,向液相区域迁移,从

而有效改善了中心偏析。当压下区间设置在 18~22 m 时,铸坯的固相率处于 0.45~1.0 区间段,由于 20 m 之后的区域已经完全凝固,进一步施加大量机械压下对于数值模拟的影响较小。因此,虽然中心偏析有所下降,但改善效果并不显著。这表明,在完全凝固后的区域进行机械压下并不能有效改善偏析问题。

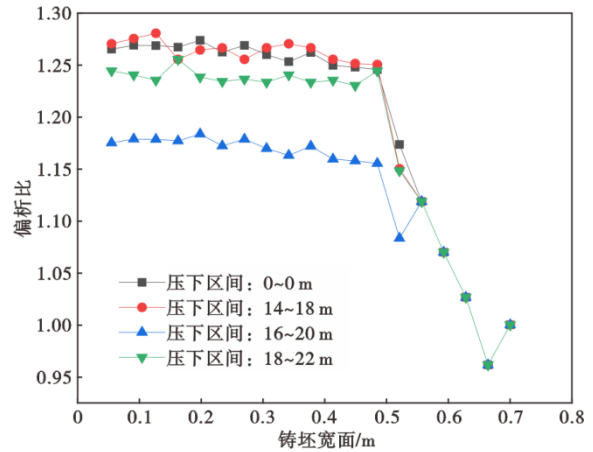


图 10 不同压下区间对偏析比的影响

Fig. 10 The influence of different reduction intervals on segregation ratio

图 11 所示了不同压下区间碳硫仪试样偏析比的对比情况。由图 11 中可以看出,当压下区间设置在靠前或靠后的位置时,偏析比的改善效果较小。这是因为压下区间的设置过于靠近铸坯的早期或晚期凝固区域,未能充分发挥压下对溶质分布的调节作用。然而,当压下区间设置在 16~20 m 时,偏析比的改善效果明显较好,表明在这一固相化程度较为适中的区间进行压下,能够有效地促进铸坯中心的溶质迁移,从而显著改善中心偏析。

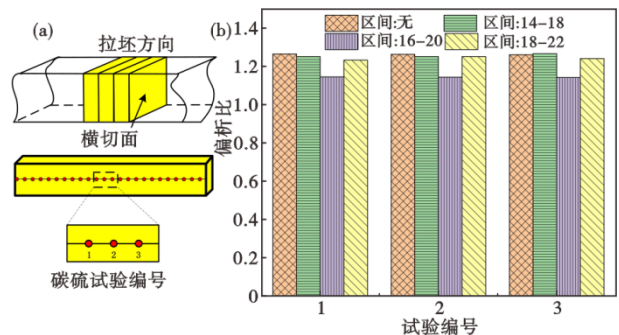


图 11 不同压下区间碳硫仪试样(a)和偏析比对比图(b)

Fig. 11 Different reduction interval carbon sulfur instrument test sample (a) and segregation ratio comparison chart (b)

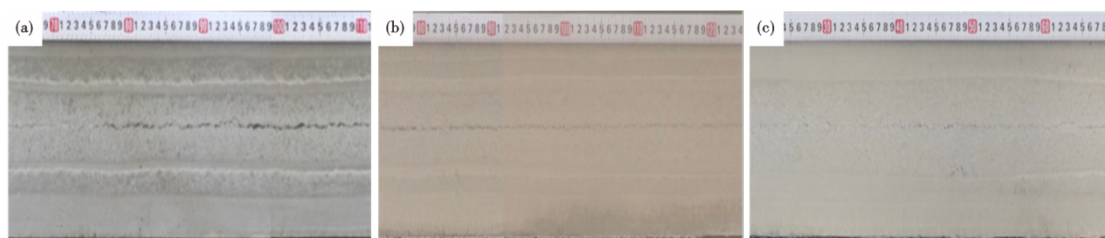


图 12 不同机械压下量对铸坯内部质量的影响图:(a)0 mm,(b)5 mm,(c)10 mm

Fig. 12 The influence diagram of different mechanical reductions on the internal quality of the slab : (a) 0 mm, (b) 5 mm, (c) 10 mm

### 2.4 机械压下工业试验的实施

由 2.3~2.4 研究结果可知,影响 22MnB5 钢内部质量的关键因素主要包括压下区间和压下量。合理设置这两组参数,能够有效补偿凝固时带来的体积收缩。为此,开展了工业试验进行验证说明。

图 12 展示了压下区间 16~20 m 不同压下量对铸坯内部质量的影响。从图 12(a)中可以看出,当不施加机械压下时,铸坯内部的中心偏析较为严重。这是由于缺乏压下带来的凝固补缩作用,使得铸坯在凝固过程中受到铸坯收缩的影响,形成了大面积的疏松区域。疏松区为中心偏析提供了有利条件,导致溶质在铸坯中心区域聚集,从而加剧了中心偏析的严重程度。因此,不施加机械压下时,铸坯内部的质量较差,中心偏析显著。

当施加 5 mm 压下时,由于一定的补缩作用,铸坯中心的疏松得到了改善,同时,中心位置的溶质受机械压下的影响,开始向液相区域挤压,进而改善了中心偏析。然而,由于施加的压下量较小,溶质向液相迁移的能力仍然有限,因此,虽然改善了中心偏析,但中心偏析仍然存在。

当施加 10 mm 压下时,由于更强的补缩作用,铸坯中心的疏松和偏析得到了显著改善。此时,铸坯内部的质量显著提升,中心偏析问题得到了有效控制,表明施加更大压下量对改善铸坯内部质量、减少中心偏析具有显著效果。

图 13 为 22MnB5 钢铸坯生产缺陷率。由图 13 可知,当未施加机械压下时,2024 年 9 月至 12 月铸坯的缺陷率分别为 3.30%、3.33%、3.50%、3.44%。施加机械压下后,铸坯的缺陷率分别为 0.70%、0.60%、0.88%、0.70%。施加机械压下较不施加机械压下缺陷率降低了 2.67%。

图 14 展示了断面为 1400 mm×300 mm 的 22MnB5 钢最佳压下区间示意图。根据图示,当在 12 m 之前施加压下量大于 5 mm 时,由于铸坯中心仍处于完全液相状态,施加的压下会导致溶质加速

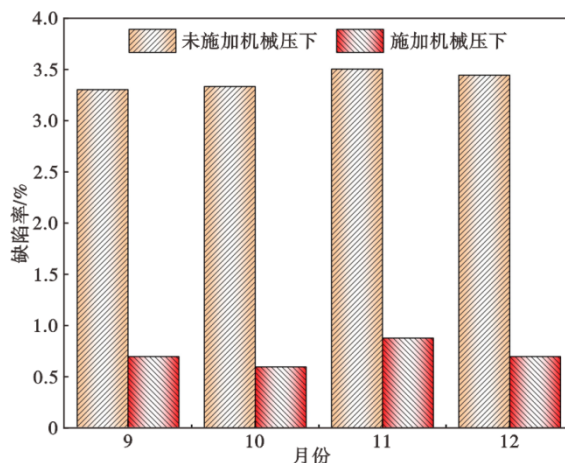


图 13 22MnB5 钢生产铸坯缺陷率

Fig. 13 Defect rate of slab produced by 22MnB5 steel

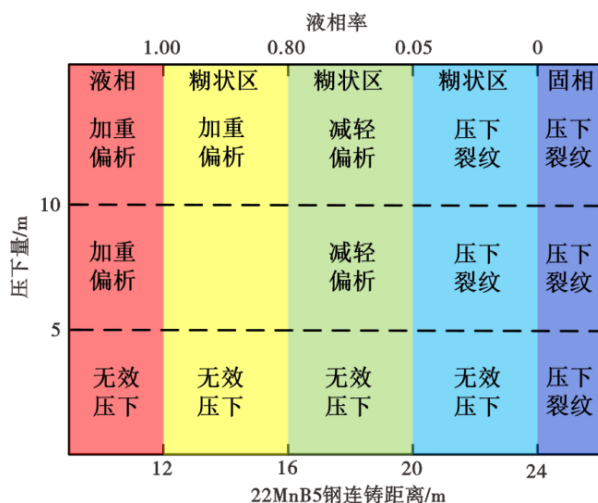


图 14 22MnB5 钢最佳压下区间示意图

Fig. 14 Schematic diagram of optimum reduction range of 22MnB5 steel

向铸坯中心聚集,这不仅无法改善中心偏析,反而可能加重偏析现象。因此,在 12 m 之前施加压下量大于 5 mm 会对偏析产生负面影响。另一方面,当压下量小于 5 mm 时,根据图 8 的分析,5 mm 压下量对中心偏析的改善程度较小,不足以有效改善铸坯的

内部质量,因此可视为无效压下。

当压下区间设置在12~16 m时,如果施加压下量大于10 mm,则会加剧该区域溶质向16~20 m钢液的迁移,进一步加重偏析现象。而压下量小于5 mm时,依然属于无效压下,不能有效改善偏析。

在16~20 m区间进行压下时,若压下量小于5 mm,仍然属于无效压下,但当压下量大于5 mm时,则能够有效减小中心偏析并改善铸坯质量。这是因为此区间不仅能够补偿凝固过程中收缩带来的疏松,还能将溶质通过机械压下向拉坯反方向的钢液区域挤压,进而改善偏析。

当压下区间大于20 m时,由于该区域的固相率已经非常高,再施加大于5 mm的压下量容易导致机械压下裂纹的发生。因此,在此区域施加过大的压下量反而会对铸坯产生负面影响,影响铸坯质量的稳定性。

### 3 结论

1)建立了动网格模型来模拟机械压下过程,耦

合流动、传热和溶质对中心偏析的影响,深入探讨了中高碳钢连铸过程中二冷区水量与机械压下参数的匹配关系,系统分析了压下工艺对铸坯内部质量的影响规律。

2)施加机械压下能够有效改善22MnB5钢铸坯的中心偏析情况,且压下量越大,改善效果越显著。尤其在施加10 mm压下量时,铸坯内部的中心偏析显著减轻,偏析比降低,铸坯质量得到显著提升。

3)在22MnB5钢铸造过程中,合理选择压下区间对中心偏析的改善具有重要作用。压下区间的选择应避免铸坯的早期和晚期凝固区域。在14~18 m区间、固相率处于0.05~0.45区间段进行压下时,由于该区域存在大量未凝固的钢液,压下反而加剧了中心偏析。而在16~20 m区间、固相率为0.2~0.95进行压下时,由于此区域的固相率处于适中范围,机械压下能有效促进溶质向液相区域迁移,改善铸坯中心的疏松和偏析,偏析比显著降低。

#### 参考文献

- [1] Fachinotti V D, Le Corre S, Triolet N, et al. Two-phase thermo-mechanical and macrosegregation modelling of binary alloys solidification with emphasis on the secondary cooling stage of steel slab continuous casting processes[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2006, 67(10): 1341-1384.
- [2] Zhu L G, Kumar R V. Shrinkage of carbon steel by thermal contraction and phase transformation during solidification [J]. *Iron-making & Steelmaking*, 2007, 34(1): 71-75.
- [3] Murao T, Kajitani T, Yamamura H, et al. Simulation of the center-line segregation generated by the formation of bridging[J]. *ISIJ International*, 2014, 54(2): 359-365.
- [4] Vynnycky M, Saleem S, Fredriksson H. An asymptotic approach to solidification shrinkage-induced macrosegregation in the continuous casting of binary alloys[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2018, 54: 605-626.
- [5] Ogibayashi S, Yamada M, Yoshida Y, et al. Influence of roll bending on center segregation in continuously cast slabs[J]. *ISIJ International*, 1991, 31(12): 1408-1415.
- [6] Yim C H, Park J K, You B D, et al. The effect of soft reduction on center segregation in C. C. slab[J]. *ISIJ International*, 1996, 36: S231-S234.
- [7] Tsuchida Y, Nakada M, Sugawara I, et al. Behavior of semi-macroscopic segregation in continuously cast slabs and technique for reducing the segregation[J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1984, 24(11): 899-906.
- [8] Qi X X, Zhang G, Jia Q. Studies on technological parameters of optimal soft reduction about superwide slab caster[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 194-196: 207-212.
- [9] Xu Z G, Wang X H, Jiang M. Investigation on improvement of center porosity with heavy reduction in continuously cast thick slabs [J]. *Steel Research International*, 2017, 88 (2) : 1600061.
- [10] 田 勇, 李 镇, 张相春, 等. 中厚板坯连铸轻压下位置预测模型开发[J]. *炼钢*, 2012, 28(5): 61-64.
- [11] 郑鑫钰, 孙彦辉, 丰 琦, 等. Q345R厚板坯连铸凝固过程数值模拟[J]. *钢铁钒钛*, 2024, 45(5): 139-146.
- [12] 黎建全, 何 博, 谢 鑫, 等. 动态轻压下技术在板坯连铸机上的应用实践[J]. *重型机械*, 2023(5): 71-76.
- [13] 陈 健, 戴宇航, 袁文武, 等. 改善70钢连铸小方坯芯部质量的工艺实践[J]. *四川冶金*, 2024, 46(5): 52-56.
- [14] 周桂成, 常运合, 汪德富. 460 mm特厚板坯质量控制工艺实践[J]. *连铸*, 2025, 50(1): 120-125.
- [15] 张殿军, 石中雪, 杨俊锋, 等. 板坯辊缝收缩优化对铸坯质量的影响[J]. *炼钢*, 2009, 25(6): 33-36.
- [16] 栾文林, 刘志远, 贾永杏, 等. 连铸机末端重压下对高建Z向钢铸坯质量的影响[J]. *河北冶金*, 2024(7): 66-71.