

连铸板坯轻压下过程压下率理论模型及其分析*

林启勇 朱苗勇

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要 通过对连铸板坯的轻压下过程分析, 导出了求解铸坯压下率的理论模型, 并考察了不同拉速下板坯压下率的变化规律。结果表明, 压下率在轻压下入口处最大, 沿拉坯方向线性减少; 拉速每增加 0.2 m/min, 平均压下率减少约 0.04 mm/m; 压下速率的取值范围不受拉速影响, 最大值为 0.36 mm/min, 最小值为 0.22 mm/min; 压下速率沿拉坯方向呈线性减少, 拉速越大, 压下速率减少越慢; 平均压下速率也不随拉速变化, 保持定值 0.29 mm/min。

关键词 连铸板坯, 轻压下, 压下率, 压下速率

中图分类号 TG249.9

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2007)08-0847-04

THEORETICAL MODEL AND ANALYSIS OF SOFT REDUCTION GRADIENT FOR CONTINUOUS CASTING SLAB

LIN Qiyong, ZHU Miaoyong

School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: ZHU Miaoyong, professor, Tel: (024)83686995, E-mail: myzhu@mail.neu.edu.cn

Supported by Key Science and Technology Program of China (No.02CJ-01-01-01) and Program for New Century Excellent Talents in University, Ministry of Education (No.NCET-04-0285)

Manuscript received 2007-01-10, in revised form 2007-04-12

ABSTRACT Based on the analysis of continuous casting slab soft reduction process, a theoretical model to solve soft reduction gradient was deduced, and the effect of casting speed on reduction gradient was investigated. The results show that the reduction gradient is the biggest at the entry of soft reduction zone, and decreases linearly along the strand. As the casting speed increased by 0.2 m/min, the average reduction gradient decreased by 0.04 mm/m. It seems that the casting speed has no effect on the range of reduction rate which changed linearly from 0.36 to 0.22 mm/min, and the average reduction rate, which also is independent of casting speed, keeps the value of 0.29 mm/min.

KEY WORDS continuous casting slab, soft reduction, reduction gradient, reduction rate

连铸坯轻压下技术目前已经被公认为是改善连铸坯凝固过程中心偏析和疏松、提高内部质量的最有效手段之一^[1-5]。尤其是动态轻压下技术, 已成为现代连铸机水平的标志^[6-8]。

轻压下技术的核心部分主要包括压下区间模型、压下率模型及压下量模型。当前, 对轻压下的研究集中在通过工业试验和实验研究来确定各模型参数^[9-11]; 对轻压下技术的理论研究中关于压下量模型^[10-13]的报道较少, 且主要集中于对轻压下过程铸坯的应力应变分析。通过检

测铸坯中心质量的状况来制定轻压下技术的关键工艺参数是当前采用的主要手段。但由于实验成本高以及实验次数少等因素, 所得工艺参数往往很难达到理想的状态, 特别是新钢种压下参数的确定困难就更大。本文在分析连铸板坯轻压下过程的基础上, 从理论上推出了压下率模型, 并结合实际条件, 考察了不同拉速下连铸板坯压下率的分布规律。

1 压下率理论模型与求解

压下率是轻压下技术的关键参数之一, 其定义为单位长度上的压下量, 即 mm/m。常提及与压下率有关的量还有压下速率(单位时间的压下量, 即 mm/min, 等于压下率与拉速的乘积)、平均压下率、平均压下速率(分别指压下区间内压下率的平均值和压下速率的平均值, 以此来衡量轻压下时的快慢程度)。这些量的变化规律将在本

* 国家技术创新计划重点项目 02CJ-01-01-01 和教育部新世纪优秀人才支持计划项目 NCET-04-0285 资助
收到初稿日期: 2007-01-10, 收到修改稿日期: 2007-04-12
作者简介: 林启勇, 男, 1980 年生, 博士生

文做详细讨论.

1.1 模型推导

连铸坯中心偏析与疏松的形成原因为凝固末端两相区内钢液的凝固收缩导致液相体积的减小, 从而形成局部降压; 该降压将会导致中心附近枝晶间的富集偏析元素钢液流动、汇集并最终凝固, 从而形成中心偏析, 体积补偿不充分就形成了中心疏松. 四分之一连铸坯横截面内凝固区域分布如图 1 所示.

图 1 中铸坯横截面由液相区 A_1 、两相区 A_2 、固相区 A_3 组成; 横坐标 x 表示宽面方向, 纵坐标 y 表示厚度方向, 垂直于纸面方向为 z 方向, 即拉坯方向; x_s 和 y_s 分别为铸坯半宽度处和半厚度处铸坯外表面的位置.

在铸坯横截面内的质量流量 M 用下式表示:

$$M = \iint_{A_1} \rho_L f_L v_{Lz} dx dy + \iint_{A_3} \rho_S f_S v_{S_z} dx dy + \iint_{A_2} (\rho_L f_L v_{Lz} + \rho_S f_S v_{S_z}) dx dy \quad (1)$$

式中, f_L 为液相率, 用 $(T - T_S)/(T_L - T_S)$ 表示 (其中 T 为当前温度, T_L 和 T_S 分别为液相线和固相线温度), f_S 为固相率, $f_L + f_S = 1$; ρ_S 和 ρ_L 分别为固相和液相密度; v_{Lz} 和 v_{S_z} 分别为液相和固相速度 (下标 z 表示拉坯方向), 当 $v_{Lz} = v_{S_z}$ 时, 就能防止凝固末端两相区内富集偏析元素的液相流动汇集, 从而防止中心偏析和疏松的形成. 同时在铸坯凝固过程中, 横截面总的质量流量在 z 方向为定值, 即 $dM/dz=0$, 这样才能保证成品断面尺寸一致. 令 $v_{Lz} = v_{S_z}$, 整理式 (1) 可得

$$M = \int_0^{y_s} \int_0^{x_s} (\rho_S f_S + \rho_L f_L) v_{S_z} dx dy \quad (2)$$

令 H 为铸坯厚度, 压下率可用 dH/dz 表示. 式 (2) 对 z 求导数, 并令 $dM/dz=0$, $\bar{\rho} = \rho_S f_S + \rho_L f_L$; 同时

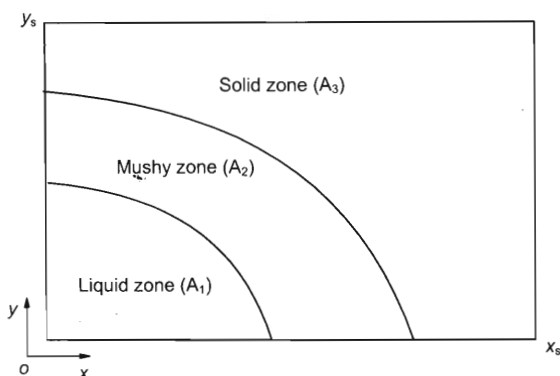


图 1 连铸坯 1/4 横截面内凝固区域分布示意图

Fig.1 Distribution of solidifying zone in a quarter of strand cross section (x_s —half width, y_s —half thickness)

为了求解压下率, 假设铸坯在轻压下过程中无宽展、 z 方向无延伸, 于是整理可得补偿热收缩和凝固收缩的铸坯轻压下必要压下率, 即

$$\frac{dH}{dz} = 2 \left(- \frac{dy_s}{dz} \right) = 2 \frac{\int_0^{y_s} \int_0^{x_s} \left(\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial z} \right) dx dy}{\int_0^{x_s} \bar{\rho}|_{y=y_s} dx} \quad (3)$$

1.2 模型求解

由式 (3) 可知, 要获得压下率就必须首先获得 f_S , f_L , ρ_S 和 ρ_L 在图 1 所示截面上的分布, 它们与连铸坯内的温度场有直接关系, 连铸坯的温度可以通过数值方法求解其凝固传热模型获得. 计算对象为某厂的连铸板坯, 成品断面尺寸为 $210 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$. 由于铸坯沿拉坯方向的传热量占有所有传热量的比例很小, 可用二维进行计算. 同时由于铸坯的对称性, 取铸坯横截面的 1/4 断面作为计算区域.

凝固传热模型计算钢种为包晶钢. 铸坯在不同的铸机位置, 采用与冷却区域相对应的传热冷却方式. 具体的物性参数与边界条件取值见文献 [14].

对式 (3) 分子分母中的定积分, 用梯形法在积分域内近似求解. 浇铸过热度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$, 计算不同拉速下的铸坯必要压下率的变化, 拉速分别为 $0.8, 1.0, 1.2, 1.4$ 和 1.6 m/min .

2 模拟结果与讨论

2.1 连铸坯的表面温度与固相率变化规律

温度场变化规律是求解压下率模型的基础. 连铸板坯在不同拉速下的表面温度分布如图 2 所示. 实线为宽面目标表面温度, 是整个温度计算的控制基础, 也是调节二次冷却水量的基准. 图 2 中铸坯宽面中心温度有波浪形的波动, 这是不同冷却回路的不同冷却效果造成的. 冷却回路的分布位置参见文献 [14]. 当拉速为 1.2 m/min 时, 铸坯宽面中心表面温度和目标表面温度吻合较好; 当拉速为

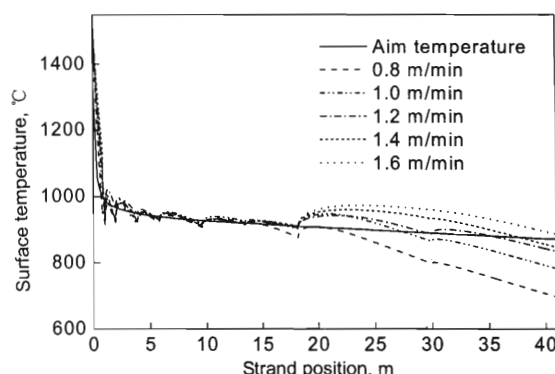


图 2 不同拉速下板坯的宽面表面温度沿拉坯方向分布图

Fig.2 Influence of casting speed on temperature distribution on the slab width surface along strand

1.6 m/min 时, 在冷却回路 8 区和 9 区, 实际铸坯宽面中心表面温度要高于目标表面温度, 这是因为 8 区和 9 区为弱冷回路, 在拉速过高时, 补偿铸坯热损失所需的水量已经超过了最大安全水量, 故热量传递不充分, 温度开始回升; 当温度为 0.8 m/min 时, 铸坯铸坯宽面中心表面温度低于目标表面温度, 从第 7 回路开始表面温度就开始降低, 这是因为在拉速过低时, 铸坯的热量带走所需的水量已经小于最小安全水量, 故热量传递充分, 温度开始远离目标表面温度, 开始下降. 由此可知, 铸机中二次冷却回路的最大 / 最小安全水量在保证形成喷雾下, 要能适应较大的拉速范围, 这样才能使铸坯宽面中心表面温度与目标表面温度吻合良好.

图 3 为不同拉速下的中心固相率沿铸机位置的分布图. 从图中可以看出, 同一拉速下的中心固相率在刚开始进入两相区时, 中心固相率增加缓慢; 随着凝固的进行, 中心固相率增加梯度越来越大. 从该图中可知, 拉速每增加 0.2 m/min, 凝固终点 (中心 $f_s=1$ 处) 的位置往后移 3.4 m 左右, 中心开始凝固点 (中心 f_s 开始大于零) 往后移约 1.5 m.

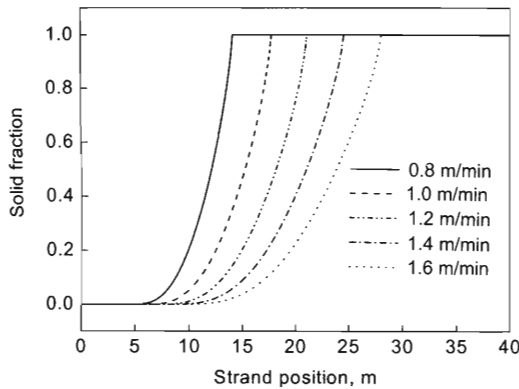


图 3 不同拉速下中心固相率沿拉坯方向分布

Fig.3 Influence of casting speed on distribution of centre solid fraction along strand

2.2 拉速对压下率的影响

图 4 为不同拉速下的压下率沿铸机的分布图. 压下区间取中心固相率为 0.3—0.7, 以下讨论压下区间均相同. 从图中总体来看, 同一拉速下压下率沿拉坯方向呈线性减少. 究其原因是在外表冷却条件变化不大的条件下, 由于凝固末端两相区内横断面 (如图 1 所示) 的液相面积逐渐减少, 这样就会使拉坯方向单位长度的凝固收缩量减少, 从而导致在压下区间内的压下率不断下降. 拉速较低时压下率的最大值和最小值都大于较高拉速对应的压下率最大值和最小值, 这是因为当拉速较低时, 铸坯表面热流较大, 铸坯凝固速率较快, 从而导致两相区长度较小; 同时由于凝固速率较快, 导致沿拉坯方向的单位长度的凝固收缩量增加, 进而导致了压下率的增加.

由图 4 推出平均压下率与拉速的分布规律, 见图 5. 在

工程实际应用中, 板坯的辊缝控制不是基于单对铸辊, 而是基于段 (多对铸辊), 所以平均压下率有重要的参考意义.

从图 5 可知, 平均压下率与拉速呈线性减少关系, 拉速每增加 0.2 m/min, 平均压下率减少约 0.04 mm/m. 本计算的压下率范围为 0.18—0.37 mm/m, 而实际某工厂应用中取得良好的中心质量的压下率范围为 0.75—1.40 mm/m, 计算值较实际应用值小, 这主要是本计算只考虑了凝固收缩对压下率的影响, 而没有考虑热收缩以及轻压下时铸坯在宽面和拉坯方向上的变形影响. 热收缩相对于凝固收缩是很小的, 可以忽略不计, 但压下的铸坯变形影响大. 压下效率可以衡量铸坯变形对轻压下的影响程度, 压下效率体现了铸坯表面压下传递到凝固前沿的效率. 据文献 [15] 报道板坯的压下效率在 20%—50% 间, 本计算值与工厂实际应用值的比值, 即位于这个 20%—50% 间, 说明计算过程是可靠的.

图 6 为不同拉速下压下速率与铸机位置的分布图. 从图中可以看出, 不同拉速下压下速率的取值范围相同, 最大值为 0.36 mm/min, 最小值为 0.22 mm/min, 且沿拉坯方向线性减少; 拉速越高, 压下速率减少越慢. 从图 6 还可以推出, 在不同拉速下的平均压下速率是不变的, 保持恒定值 0.29 mm/min. 值得一提的是, 在实际生产过

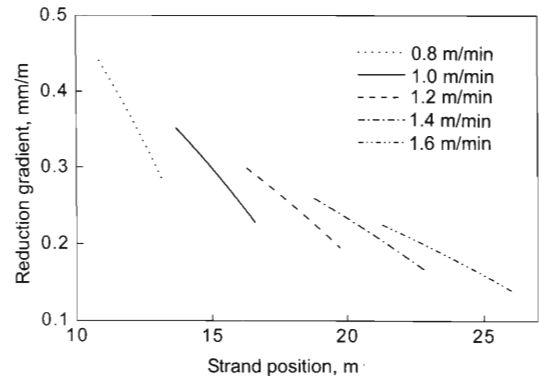


图 4 不同拉速下压下率沿拉坯方向的分布图

Fig.4 Soft reduction gradient vs strand position for various casting speeds

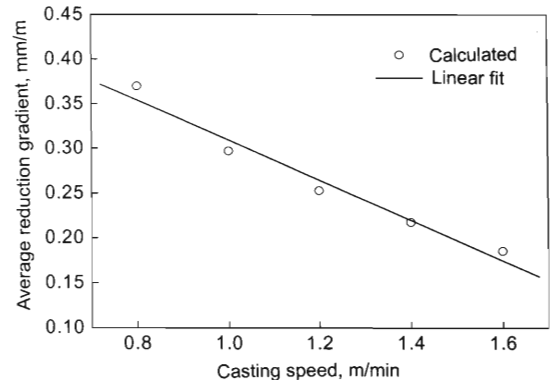


图 5 平均压下率与拉速的分布图

Fig.5 Average soft reduction gradient vs casting speed

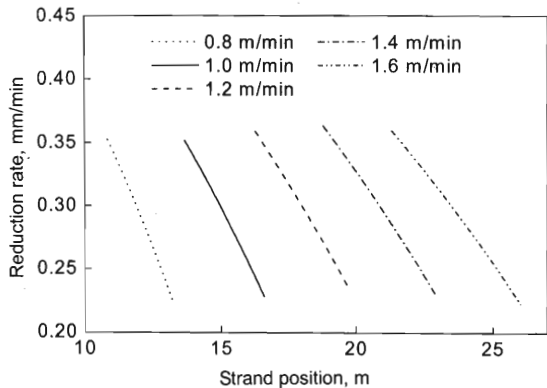


图 6 不同拉速下压下速率沿拉坯方向的分布图

Fig.6 Influence of casting speed on distribution of soft reduction rate along strand

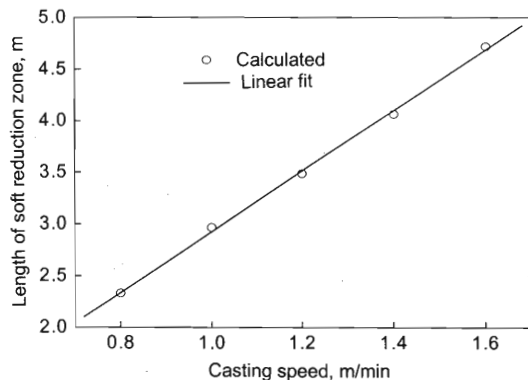


图 7 不同拉速下压下区间的长度分布

Fig.7 Length of soft reduction zone vs casting speed

程中, 压下量往往是不随拉速的变化而变化的. 压下量可用平均压下速率与压下时间的乘积表示, 压下时间随拉速的变化规律可由图 7 得出. 图 7 为不同拉速下压下区间长度的分布, 从图中可以看出, 压下区间长度与拉速呈线性正比关系, 拉速每增加 0.2 m/min, 压下区间长度增加 0.6 m. 也就是说压下区间长度与拉速的比为定值, 这表示在不同拉速下, 轻压下作用时间是不变的. 由此可得出, 在钢种、铸坯断面尺寸与压下区间一定的条件下, 轻压下的压下量是一定的, 从理论上证明了实际生产过程中压下量不随拉速的变化而变化.

3 结论

在导出求解压下率的理论模型的基础上, 结合具体钢种和铸坯尺寸研究了不同拉速下压下率的变化规律, 获得

如下结论:

(1) 同一拉速时, 压下率在轻压下入口处最大, 沿拉坯方向近似线性减少; 不同拉速时, 拉速较低时压下率的最大值和最小值都大于较高拉速对应的压下率最大值和最小值.

(2) 拉速低, 平均压下率高; 拉速高, 平均压下率低. 平均压下率与拉速呈线性减少关系, 拉速每增加 0.2 m/min, 平均压下率减少约 0.04 mm/m.

(3) 压下速率的取值范围不受拉速影响, 最大值不超过 0.36 mm/min, 最小值不低于 0.22 mm/min; 压下速率沿拉坯方向呈线性减少, 拉速越高, 减少越慢.

(4) 平均压下速率不随拉速的变化而变化, 保持定值 0.29 mm/min.

参考文献

- [1] Sivesson P, Hallen G, Widell B. *Ironmaking Steelmaking*, 1998; 25: 239
- [2] Raja V R, Pal N, Jayaswal N P. *Steel Times Int*, 2005; 29(4): 41
- [3] Scholes A. *Ironmaking Steelmaking*, 2005; 32: 101
- [4] Flemings M C. *ISIJ Int*, 2000; 40: 833
- [5] Yim C H, Park J K, You B D, Yang S M. *ISIJ Int*, 1996; 36(Suppl.): 231
- [6] Morwald K, Thalammer M, Federspiel C, Gould L. *Steel Times Int*, 2003; 12(1): 17
- [7] Morsut L. *MPT Int*, 2003; 26(2): 44
- [8] Heinz H, Manfred T, Michael S, Oliver S, Lawrence G. *MPT Int*, 2003; 26(3): 74
- [9] Shigeaki O, Masayuki K, Mamoru Y, Tatsuo M. *ISIJ Int*, 1991; 31: 1400
- [10] Ralph N, Karl-Heinz S. *Steel Res*, 2003; 74: 700
- [11] Yamanaka A, Okuda M. *Ironmaking Steelmaking*, 1999; 26: 64
- [12] Chen S Q, Zhang J Q, Cui L X, Gan Y, Ni M S. *J Iron Steel Res*, 2003; 15(2): 9
(陈素琼, 张家泉, 崔立新, 干勇, 倪满森. 钢铁研究学报, 2003; 15(2): 9)
- [13] Chen Q A, Li Z L, Wang L Z, Wang J W. *Iron Steel*, 2001; 36(9): 38
(陈其安, 李振亮, 王连仲, 王建伟. 钢铁, 2001; 36(9): 38)
- [14] Lin Q Y. *Master Thesis*, Northeastern University, Shenyang, 2004
(林启勇. 东北大学硕士学位论文, 沈阳, 2004)
- [15] Ito Y, Yamanaka A, Watanabe T. *Rev Metall*, 2000; 97: 1171